决战科技宇宙之巅

（套装共10册）



看得懂的完整宇宙
没见过的先锋科技

VISIT...

LANZAROTE Caliente.com

决战科技宇宙之巅

（套装共10册）



看得懂的完整宇宙
没见过的先锋科技

总目录

给忙碌者的天体物理学
发现的乐趣
给仰望者的天文朝圣之旅
太阳系度假指南
茶杯里的风暴
140亿年宇宙演化全史
诗意的原子
给好奇者的暗黑物理学
18个未来进行时
给未来人类的终极12问

未讀

亚马逊2017
科学类年度好书

《纽约时报》
非虚构畅销榜榜首

Goodreads 2017
科普书读者票选冠军

ASTROPHYSICS FOR

给忙碌者的天体物理学

Neil deGrasse Tyson

PEOPLE

再忙，也要记得仰望星空
认识宇宙，就是重新认识自己

霍金科学传播奖得主、美国明星科学家尼尔·泰森著作
上市仅一年全球畅销 100 万册，售出 38 国版权

万维钢
李　淼
张双南

作序推荐

写给每一位地球人的宇宙通识读物

ASTROPHYSICS FOR PEOPLE IN A HURRY

〔美〕尼尔·德格拉斯·泰森——著　孙正凡——译

北京联合出版公司
Beijing United Publishing Co.,Ltd

版权信息

给忙碌者的天体物理学

ASTROPHYSICS FOR PEOPLE IN A HURRY

作者：[美] 尼尔·德格拉斯·泰森（Neil deGrasse Tyson）

译者：孙正凡

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

推荐序1
推荐序2
推荐序3
自序
01 有史以来最伟大的故事
The Greatest Story Ever Told
02 在地如在天
On Earth as in the Heavens
03 要有光
Let There Be Light
04 在星系之间
Between the Galaxies
05 暗物质
Dark Matter
06 暗能量
Dark Energy
07 元素周期表里的宇宙
The Cosmos on the Table
08 关于球形这回事儿
On Being Round
09 不可见光
Invisible Light
10 在行星之间
Between the Planets
11 另一个地球
Exoplanet Earth
12 基于宇宙视角的反思
Reflections on the Cosmic Perspective
致谢
返回总目录

对那些因为太忙而没空读大部头的人来说，

仍然有一条道路可以理解宇宙。

推荐序1

万维钢

偶尔仰望星空的时候，你会想到什么呢？你想到了宇宙之博大和个人之渺小、想到了真理、想到了公平和正义吗？如果只想到这些，你就错过了最动人的主题。

现代天体物理学比任何文艺青年所想象的东西都要丰富很多很多倍，也精彩很多很多倍。我们赶上了一个新观测手段层出不穷、宇宙知识爆发式增长的时代。我们今天对宇宙的了解，跟一百年之前，甚至几十年之前都非常不一样。我们已经有很大的把握知道这个宇宙是怎么回事，而你也有权知道。

这本书允许你问这个宇宙是从哪里来的这种大问题，并且提供了相当可靠的答案——而你将会发现，这其实是非常幸运的事情，因为正如泰森所说，宇宙本来没有义务让我们理解。

尼尔·泰森是卡尔·萨根的传人，他是这样一本书最合适的作者。你的阅读历程将伴随着赞叹和思考，你将收获一个宇宙学的视角。

推荐序2

张双南

现代社会大家都很忙，但是又都兴趣很广，对天文宇宙的爱好几乎成了“文化人”的标识之一。然而，大部分人在学校都没有学习过天文和天体物理学，面对滚滚而来、整天刷屏的各种天文新发现的报道，很多人虽然常常不明觉厉，但是还是想知道到底是怎么回事，否则就不能愉快地和人谈论各种天文宇宙的最新话题了。系统地上天文课？太忙，没有时间！抽碎片时间系统地读天体物理的书？太折磨人了，实在是看不进去啊！这本书就是大家的福音！仅仅12章、6万字，就把从宇宙诞生到寻找地外家园这些主题都说清楚了，最后还进一步引发人们对人生和宇宙的哲学思考！

既然大家都很忙，那么我推荐两种阅读方式：对像我这样连周末和假期都没有的读者，您可以一次读一章，花15～20分钟，不难吧？对于那些也非常忙，但是偶尔能够有个周末或者假期的读者，我建议您就一口气读完，这样比较过瘾！还等什么？现在就开始读吧！

推荐序3

李淼

生活在21世纪开端，有时我们并不知道这个时代有多特殊。但是，只要我回想起青年时代读到的关于天文和宇宙的科普书籍，就发现在短短的三十年中，人类在理解宇宙这件事上走了多么远。

我们现在可以讲述一个几乎完整的关于宇宙的故事，这个故事既宏大又迷人。宇宙开始于一场大爆炸，之后一些元素形成了，一些恒星和星系形成了。星系中不断有新的恒星形成，有超新星爆发，甚至有黑洞互相碰撞。这是一个既神奇又可以理解的宇宙，而我们这些生活在暗淡蓝点一般的地球上的人，看起来是宇宙中的一粒尘埃，却又是能够理解宇宙的一种生命。

我是一口气读完尼尔·德格拉斯·泰森这本精彩的关于宇宙的书的，它本身就是一个童话一般的故事。作者本人就是一位善于在视频中讲述科学故事的人，这一次，我相信你也会一口气读完这个故事。

自序

最近几年，几乎每个星期，都会有一个值得上新闻头条的宇宙新发现。尽管这有可能是媒体把关人对宇宙产生了兴趣，不过这些新闻数量的上升更可能来自公众科学兴趣的真正提升。相关的证据有很多，从受科学启发或包含科学内容的热门电视节目，到由大牌明星主演、著名电影公司和导演拍摄的科幻影片的成功。最近，以重要的科学家为主角的传记电影已经自成流派。科学节、科幻大会和科普纪录片也在世界各地广为流行。

在这类科幻影片中票房颇高的，是由一位著名导演拍摄的，发生在绕着遥远恒星运行的一颗行星上的故事，一位著名女演员扮演的天体生物学家在电影中占据了非常重要的角色。虽然在这个时代，大多数科学分支都有长足发展，但天体物理学一直是其中的翘楚。我想我知道原因：我们每一个人在某个时间都曾仰望夜空，都想知道：这一切意味着什么？它是如何运行的？我在宇宙中处于什么位置？

如果你实在太忙了，没空通过上课、读教科书或看纪录片来理解宇宙，可你仍在寻找对这个领域简短而有意义的介绍，那么我为你提供了这本《给忙碌者的天体物理学》。在这本小书里，你将对推动当代宇宙学的所有主要思想和发现获得基础而连贯的了解。如果我讲得还不错，你就会从人文意义上通晓我的专业领域，那时你可能会渴望进一步深入了解宇宙。

宇宙没有义务让你理解。

——

尼尔·德格拉斯·泰森

01　有史以来最伟大的故事

The Greatest Story Ever Told

世界已经存在很多年了，

它一旦被设定了合适的运动，

其他的一切都随之而来。

——

卢克莱修，古罗马哲学家，约公元前50年

起初，将近140亿年前，已知宇宙所有的空间、所有的物质、所有的能量，都包含在一个极小极小的尺度之内，比这句话末尾的句号的一万亿分之一还要小。

那时的温度是如此之高，自然界中描述这个宇宙的四种基础作用力还是统一的。虽然我们依然不知道它是如何出现的，但这个比针尖还要小的宇宙只能膨胀——急速膨胀。我们将其称为大爆炸。

爱因斯坦在1916年发表的广义相对论，为我们提供了关于引力的现代理解，即物质和能量的存在弯曲了围绕它们的空间和时间结构。在20世纪20年代，量子力学被发现，为我们提供了微观世界的现代观念：分子、原子和亚原子粒子。但是这两种对自然界的理解方式在形式上是彼此不相容的，这使得物理学家们开展了一场竞赛，要将微观理论与宏观理论融为一种内在一致的量子引力理论。虽然我们还没有达成目标，但我们知道最大的困难所在。其中之一是在早期宇宙的“普朗克时期”。那是大爆炸之后时间间隔从$t = 0$到$t = 10^{-43}$秒（1秒的千亿亿亿亿亿分之一），并在宇宙尺度增长到10^{-35}米（1米的千亿亿亿亿分之一）之前。这些难以想象的小尺度被命名为普朗克时间和普朗克长度，马克斯·普朗克（Max Planck）是德国科学家，他在1900年引入了量子化能量的概念，被誉为“量子力学之父”。

引力和量子力学之间的冲突对当代宇宙没有什么实际的影响。天体物理学家们把广义相对论和量子力学的原理和工具应用于不同种类的问题。但在宇宙开始的时候，也就是普朗克时期，极大也是极小，我们怀疑两者一定曾经有某种强制联姻。唉，然而我们对它们在那个仪式上交换的誓言一无所知，所以没有任何（已知的）物理定律能够描述宇宙在那个时期的行为。

尽管如此，我们预计在普朗克时期结束时，其他三种自然力仍然统一，引力逐渐分离出来，成为我们目前的理论可以很好地描述的独立作用力。随着时间达到10^{-35}秒，宇宙继续膨胀，稀释了所有曾集中的能量，刚才还保持统一的作用力分裂成“弱电力”和“强核力”。后来弱电力分裂成电磁力和“弱核力”，从而使得我们已经能够认识到的四种作用力显露了出来：决定放射性衰变的弱核力，把原子核束缚起来的强核力，

使得分子结合在一起的电磁力，把大团物质聚集在一起的引力。

-

从宇宙诞生开始，至此过去了万亿分之一秒。

-

在那段时间，以亚原子粒子的形式存在的物质，与以光子的形式存在的能量（光子既是粒子又是波）之间的相互作用持续不断。那时的宇宙温度足够高，这些光子会自发地把它们的能量转换为物质-反物质粒子对，紧接着又彼此湮灭，把能量重新转换为光子对。是的，反物质是真实的，我们已经发现了它，这并不是科幻作家的想象。这种能量和物质之间的转换完全遵守爱因斯坦最著名的质能方程：$E=mc^2$，它既可以用来算你的能量“值”多少物质，也能用来算你的物质“值”多少能量。方程里c^2是光速的平方，它是个巨大的数字，用它乘以质量，让我们知道在这个“运算”中我们可以获得多么巨大的能量。

在强核力和弱电力分道扬镳之前、之中、之后这段极短的时间里，宇宙变成了由夸克、轻子和它们的反物质兄弟——还有承担它们相互作用力的玻色子——共同组成的一大锅沸汤。这些粒子家族每一类都有好几个变种，但它们都被认为无法再分割成更小或更基本的粒子了。普通的光子是玻色子家族的一员。对于非物理学家来说最熟悉的轻子就是电子，可能还有中微子。至于最熟悉的夸克……好吧，没有你们熟悉的夸克。夸克一共有六种，每一种都被赋予了一个抽象的名称，这些名字不具有真正的语言学、哲学，或教育学的目的，只是为了区别彼此：上夸克和下夸克、奇异夸克和粲夸克、顶夸克和底夸克。

玻色子，顺便说一下，是根据印度科学家萨特延德拉·纳特·玻色而命名的。“轻子”这个词来源于希腊文leptos，意思是“轻”或“小”。然而“夸克”这个名字则有一个颇具文学色彩也更富想象力的起源。物理学家莫瑞·盖尔曼在1964年提出存在夸克，它们是中子和质子的内部成分，他当时

认为夸克家族只有三名成员，所以从詹姆斯·乔伊斯的小说《芬尼根的守灵夜》里一句含义出名模糊的句子“向麦克老人三呼夸克”（Three quarks for Muster Mark）借用了夸克（quark）这个词。这些夸克有一个共同的特征：它们的名字都特别简单——这似乎是当化学家、生物学家，特别是地质学家在给他们自己的研究对象命名时无法做到的事情。

夸克是古怪的野兽。它们跟质子和电子有个不同的性质，每个质子拥有+1电荷，电子拥有的电荷为-1，可是夸克具有的电荷为分数——只能是1/3或2/3。而且你永远不可能抓住一个单独的夸克，它总是跟附近的其他夸克抱成团。事实上，你把两个或更多个夸克分开的距离越远，把它们束缚在一起的力量也会随之增强——它们就像是被原子核内的某种橡皮筋拴在一起。夸克被分离得足够远时，橡皮筋断裂，原本储存的能量会“召唤”质能方程$E=mc^2$在橡皮筋两端各产生一个新的夸克，把你又带回到了起点。

在夸克-轻子时代，宇宙是足够致密的，不相连的夸克之间的平均距离，足以与相连夸克之间的距离相比。在这种情况下，相邻夸克之间无法建立明确的忠诚关系，它们在彼此之间自由地移动，尽管总的来说仍然彼此束缚在一起。这种好像夸克汤一样的物质状态，是2002年由纽约长岛布鲁克海文国家实验室的物理学家们发现的。

强有力的理论证据表明，在极早期宇宙中的一段时间，某种作用力分离之时，赋予了宇宙一种非同寻常的不对称性，其中物质粒子的数量略微超过反物质粒子：比例为十亿零一比十亿。即使那时有人的话，也不会注意到夸克和反夸克、电子和反电子（更常用的名字是正电子）、中微子和反中微子在连续创造、湮灭和再制造过程中产生的如此之小的数量差异。一个人有大把机会找一个“反物质人”彼此湮灭，其他的人也都是如此。

但不久之后就不一样了。随着宇宙的不断膨胀并且冷却，宇宙增长到大于我们的太阳系尺度时，温度已经迅速下降到1万亿开尔文[1]以下。

现在，百万分之一秒过去了。

-

在这个不温不火的时期，宇宙的温度和密度没有那么高了，不足以“煮”夸克汤了，所以它们都抓住了身边跳舞的伙伴，创造了一个永久性的重粒子新家族，称为强子（hadron，来自希腊文hadros，意思是“厚”）。这种从夸克到强子的转变很快形成了质子和中子，以及其他不为人所熟悉的重粒子，它们都是由各类夸克的彼此组合形成的。在瑞士（我们回到地球上来）欧洲核子研究组织（更广为人知的是其缩写CERN）用一台大型加速器使强子束发生碰撞，试图重新创造这些极端条件。这个世界上最大的机器便被顺理成章地叫作“大型强子对撞机”。

夸克-轻子汤里令人困扰的微小的“物质-反物质不对称性”如今传递到了强子中，但产生了非凡的后果。

随着宇宙继续冷却，可供自发产生基本粒子的能量在减少。在强子时代，环境中的光子因为没有足够的能量，不能再根据质能公式$E=mc^2$来制造夸克-反夸克对。不仅如此，从仍存在的正反物质湮灭中产生的光子，也由于宇宙的不断膨胀而在损失能量，降到了产生强子-反强子对所需的能量门槛之下。每10亿次的粒子湮灭（由此留下10亿个光子）才会有一个强子幸存。那些孤独的幸存者最终将笑到最后：它们是产生星系、恒星、行星和牵牛花的终极物质来源。

如果没有在物质和反物质之间十亿零一与十亿的不平衡，宇宙中的所有物质都将自我湮灭，留下一个由光子组成的宇宙，没有别的——永远是“要有光，就有光”的景象。

-

现在，一秒钟的时间已经过去了。

-

宇宙尺度已经增长到了几光年（1光年是光在1地球年里传播的距离，约10万亿千米），大约相当于从太阳到离它最近的恒星的距离。此时温度为10亿开尔文，仍然是非常之热——仍然能够“煮”电子以及与其对应的正电子，电子-正电子继续玩着跳出来又消失的游戏。但在不断膨胀、不断冷却的宇宙里，它们的日子（说真的，是秒数）已经在倒计时了。夸克的命运，强子的命运，也将成为电子的命运：最终只有十亿分之一幸存下来。其他的电子都和它们的反物质伙伴儿发生湮灭，融入了光子的海洋。

就在现在，每个质子对应一个电子已经被“冻结”成为现实。随着宇宙继续降温，降到1亿开尔文以下时，质子与质子当然还有中子发生融合形成原子核，孵化出一个婴儿宇宙，其中90%的原子核是氢，10%是氦，还有痕量的氘（重氢）、氚（超重氢）和锂。

-

从宇宙诞生开始，已经过去了两分钟。

-

接下来38万年里，我们的粒子汤里没有发生什么新鲜事。在这漫长的时光里，宇宙温度仍然足够高，高能电子可以自由地在光子之间漫游，就像来回击球一样不断地吸收和发射光子，发生相互作用。

但是，当宇宙温度低于3000开尔文（大约是太阳表面温度的一半）时，这种自由自在就戛然而止了，所有的自由电子都跟原子核发生了结合。它们的联姻留下了无处不在的可见光，不仅为那一刻天空中的所有物质留下了永远的印记，也宣告了原初宇宙粒子和原子的形成过程已经

完成。

****

在第一个10亿年里，宇宙继续膨胀并冷却，这时物质因为引力作用聚集成团，形成了我们所称的星系，数量近1000亿。每个星系都含有几千亿颗恒星，恒星核心发生着热核聚变。那些质量超过太阳数十倍的恒星，其核心具有足够高的压力和温度，从而制造了比氢要重的几十种元素，正是基于这些元素，才构成了行星，为生命勃发提供了场所。

如果这些元素停留在它们形成的地方，那它们将毫无用处。不过，大质量恒星会发生不可预料的大爆炸，把元素种类丰富的内核抛撒到整个星系，这种重元素丰度（数量密度）增加的过程，称为增丰。这样的增丰过程持续90亿年之后，在宇宙的一个平凡角落（室女超星系团的外围），一个平凡的星系（银河系）中，一块平凡的区域（猎户旋臂）上，一颗平凡的恒星（太阳）诞生了。

从其中形成太阳的气体云包含了足够多的重元素，凝聚生成了一系列相互绕转的天体，其中包括几颗岩石行星和气态行星、数以万计的小行星和数十亿颗彗星。在最初的几亿年里，在轨道上残留的横冲直撞的大量碎片被吸积到更大的天体上。这是以高速、高能撞击的形式发生的，从而熔化了岩石行星的表面，阻止了复杂分子的形成。

随着在太阳系中留下来的可吸积物质越来越少，行星表面开始冷却。我们称之为地球的这颗行星形成于太阳周围的“金发女孩区域”[2]，这里的海洋主要以液态形式存在。如果地球离太阳更近，海洋就会被蒸发掉；如果地球离得更远，海洋就会结冰。无论哪种情况，我们所知道的生命都不会诞生。

在富含化学物质的液态海洋中，通过一种尚未发现的机制，有机分子转变为可自我复制的生命。在这个原始汤中占主导地位的是简单的厌氧菌——在无氧环境中繁衍的生命，但会排泄出作为副产物的氧气。这些早期的单细胞生命体不知不觉地将地球上富含二氧化碳的大气层转化为富含氧气的环境，使需氧生物体能够出现并主宰海洋和陆地。相同的氧原子通常以氧气（O_2）的形式成对出现，也能在大气层高处形成臭氧

（O_3）层，它就像盾牌一样吸收了阳光中大部分紫外光子，从而保护地球的表面不受其伤害——紫外线能破坏分子结构。我们把令人惊奇的生命多样性归功于地球，当然我们假设在宇宙其他地方也有丰富的碳，也有无数含碳的简单或复杂的分子。毫无疑问：碳基分子的复杂多样要远超其他元素组合出来的分子结构。

但生命是脆弱的。地球偶尔会与个头较大又任性的彗星和小行星相撞，这种事件在历史上很常见，足以毁掉我们的生态系统。仅仅6500万年前（距离我们的时间不到地球历史的2%），一颗百亿吨的小行星撞击了现在墨西哥的尤卡坦半岛，抹杀了超过70%的地球动植物种类——包括所有著名的超级恐龙。这次大灭绝使我们的哺乳动物祖先能够填补新的空缺，而不是继续充当霸王龙的开胃小菜。这些哺乳动物中一个脑袋很大的分支，我们称之为灵长类，其中一个属种（智人）拥有了足够的智慧来发明科学的方法和工具——去推断宇宙的起源和演化。

在这一切之前发生了什么？在开始之前发生了什么？

天体物理学家不知道。或者，我们最有创意的想法在实验科学看来几乎或者完全缺乏基础。一些宗教人士用一种带有正义色彩的断言作为回应，认为这一切必须有某种东西作为启动：一种比其他所有力量都要大的力量，一个一切问题的源头，一个原动力。当然，在这样的人士心目中，某种东西就是上帝。

但是，会不会宇宙是永恒的存在，只是它的状态我们尚未认识到呢——比如，它是一个不断诞生宇宙的多重宇宙？或者，如果宇宙仅仅是从一无所有中冒出来的呢？或者，如果我们所知道和热爱的一切都只是一个具有超级智慧的外星物种为了好玩而做的计算机模拟游戏呢？

这些哲学上有趣的想法通常满足不了任何人。然而，它们总能提醒我们："不知道"才是科学家的自然心态。那些相信自己无所不知的人，既没有寻找更没有看过宇宙中已知和未知的界限。

我们所知道的是，我们可以毫不犹豫地断言的是，宇宙有一个开始。宇宙在继续演化。而且，是的，我们身体里的每一个原子都可以追溯到宇宙大爆炸，以及50多亿年前发生爆炸的大质量恒星里的核聚变。

我们是获得了生命的星尘，然后被宇宙赋予了发现自我的使命——而我们的旅程才刚刚开始。

02　在地如在天

On Earth as in the Heavens

在艾萨克·牛顿爵士写下万有引力定律之前，没有人曾根据任何理由推测出我们身边的物理定律和宇宙中其他地方的是一样的。地球上一直发生的是尘世之事，而天上发生的是天界之事。根据那时基督教的教义，上帝控制诸天，我们卑微凡人的思维无法触及它们。当牛顿提出所有运动都是可理解的、可预测的，从而突破这一哲学障碍时，一些神学家批评他没有留下什么事情给造物主做。牛顿已经想通了，果园里使成熟苹果落下的引力，也同样让被扔出的物体沿着曲线路径运动，还让月亮在轨道上围绕地球转动。牛顿的万有引力定律也同样引导行星、小行星和彗星绕太阳公转，使上千亿颗恒星在银河系内的轨道上转动。

不是别的，正是这种物理定律的普适性驱使着科学发现。引力只是一个开端。想象一下19世纪天文学家们用实验室里的棱镜去观察太阳光，看到棱镜将光束分解成光谱时的那种激动。光谱不仅是美丽的，而且含有发光对象的大量信息，包括其温度和成分。通过光谱里的亮线或暗线可以揭示物质元素的存在。让人们高兴和惊奇的是，太阳物质的化学特征和实验室物质的特征是一样的。棱镜不再是化学家的专用工具，它证明，虽然太阳的大小、质量、温度、位置和外观与地球并不相同，不过两者都含有同样的物质：氢、碳、氧、氮、钙、铁等。但比两者的共享成分清单更重要的是，科学家们认识到在太阳上形成这些光谱特征的物理学定律，跟在1.5亿千米之外的地球上起作用的定律是一样的。

这种普适性的概念被成功地逆向运用，而且成果丰硕。对太阳光谱的进一步分析揭示了太阳光谱中存在一种元素，其特征在地球上没有已知的对应物。作为来自太阳的新物质，它被赋予了一个从希腊文helios（太阳）拼出的名字，这就是氦（Helium），后来这种元素才在实验室里被发现。因此，氦成为元素周期表里第一个也是唯一在地球以外被发现的元素。

OK，物理定律在太阳系中有效，但它们在银河系中还有效吗？整个宇宙呢？穿越时空呢？一步一步地，物理定律接受了检验。附近的恒星被证明也由我们熟悉的物质构成。遥远的双星在相互绕转的轨道上，似乎也知道牛顿引力定律的一切。同理，两个星系组成的系统也是如此。

就像地质学家可以把沉积的地层作为地球历史事件的时间线，我们

在太空中看到的距离越远，我们看到过去的时间就越长。宇宙中最遥远天体的光谱显示了与我们在近处空间和时间里看到的相同的化学特征。实际上，在过去重元素比较少——它们主要是在后来几代爆炸的恒星里制造出来的——但描述原子和分子是如何产生这些光谱特征的定律是原封不动的。特别是，有一个被称为“精细结构常数”的物理量——它控制着每个元素的基本光谱特征，必定是在数十亿年间保持不变的。

当然，并非宇宙中所有事物和现象在地球上都有对应物。你可能从来没有穿越过一团温度百万开尔文的发光等离子体，而且我敢打赌，你从来没有在街上迎面遇到过一个黑洞。重要的是描述它们的物理定律具有普适性。当光谱分析被第一次应用于恒星际星云发出的光时，再一次，在光谱当中发现的一个特征并没有在地球上找到对应物。当时元素周期表明显没有给这个新元素留下合适的位置。作为回应，天体物理学家们发明了（nebulium）这个名字占位，直到他们能够弄清楚到底发生了什么。事实证明，在太空中，气态星云是如此之稀薄，以至于原子在没有碰撞的情况下可以跑很远。在这些条件下，电子可以做到在地球实验室中原子内从未见过的一些事情。只是普通氧元素在星云环境里表现出的非同反响的特征而已，在地球实验室环境下通常是不可能发生的。

这一物理定律的普适性告诉我们，如果我们降落在另一个拥有繁荣文明的外星球上，它们将按照我们在地球这里发现和检验过的同样的定律运行——即使外星人怀有不同的社会和政治信仰。此外，如果你想和外星人交谈，你可以肯定他们不会说英语、法语，甚至中文。你也不知道跟他们握手——如果他们伸出的肢体确实是一只手——会被视为战争还是和平行为。你最大的希望是找到一种使用科学语言进行交流的方法。

这种尝试被用在了20世纪70年代的先驱者10号和11号、旅行者1号和2号上。这四艘航天器当时都带上了足够的能量（核动力电池），希望在巨行星引力弹弓效应的帮助下，最终彻底逃离太阳系。

先驱者号上带了一张蚀刻金盘，用科学象形图显示了我们太阳系的布局、我们在银河系的位置，以及氢原子的结构。旅行者号更进一步，还携带一张包含来自地球母亲的不同声音的金质唱片，包括人类心跳、

鲸“歌”和来自世界各地的音乐精选，包括贝多芬和摇滚明星查克·贝里（Chuck Berry）的作品。虽然这种信息适合人类聆听，但现在还不清楚外星人的耳朵是否会知道他们在听什么——首先要假设他们有耳朵。我最喜欢的桥段是，在旅行者号发射后不久，在美国国家广播公司（NBC）的《星期六夜现场》滑稽短剧中，他们出示了发现宇宙飞船的外星人的回信，信纸上只写着“再多发点查克·莓果[3]”。

科学的繁荣不仅在于物理定律的普适性，也体现在物理常数的存在和持久性上。万有引力常量，经常被科学家亲切地称为“大G”（big G），它就为牛顿的引力方程提供了引力常量大小的测量值。这个量已经默默地接受了亿万年物转星移的检验。如果你做相关计算，你可以确定恒星发光和大G的关系非常紧密。换言之，如果大G在过去稍稍有所不同，那么太阳能量输出的变化就会比任何生物、气候或地质记录显示的变化要大得多。

这就是我们宇宙的统一性。

****

在所有的常量中，光速是最著名的。不管你走得多快，你永远也不会超过一束光。为什么不行呢？从来没有任何实验曾显示任何形式的物体达到过光速。经过无数次检验的物理学定律预测并解释了这一事实。我知道这听起来显得很保守。过去一些最低级的科学断言低估了发明家和工程师的聪明才智，比如“我们永远不会飞起来”“飞行将永远不具有商业可行性”“我们永远无法分裂原子”“我们永远无法打破音障”“我们永远到不了月球”。但它们的共同点是，没有既定的物理定律支持这些说法。

“我们永远不会超越一束光”这一说法是一个性质完全不同的预测。它遵循了基本的、经过时间考验的物理原则。未来的星际旅行者将有理由读到这样的路标：

光速：

这不只是一个好主意，

更是定律。

不同于在地球上被抓住违法超速才会被开罚单，物理定律相比于法律的好处是，它们不需要执法机构来维护，因为你根本无法违反它，虽然我曾经有一件极客范儿T恤衫上写着“服从引力”（OBEY GRAVITY）。

所有的测量都表明已知的基本常数以及引用它们的物理定律，既不依赖时间，也不依赖位置。它们是真正的恒定和统一的。

****

许多自然现象表现为多种物理定律在起作用。这一事实常常使分析复杂化，在大多数情况下，需要高性能的计算机来算出正在发生什么，并跟踪重要参数。当舒梅克-利维9号彗星在1994年7月高速冲进木星浓厚的大气层然后爆炸时，对这场爆炸制作的最精确的计算机模型结合了各种物理定律：流体力学、热力学、运动学和万有引力定律。气候和天气代表了另一方面的例子——复杂（和极难预言的）现象。但是约束它们的基本定律仍然在起作用。木星大红斑是已经肆虐了至少350年的强气旋，驱动它的是与地球上和太阳系其他地方产生风暴的相同的物理过程。

另一类普遍真理是守恒定律，其中某些测量量在任何情况下都保持不变。最重要的三个是质量和能量的守恒、线性动量和角动量的守恒，以及电荷的守恒。这些定律的证据既存在于地球上，也存在于我们已经

想到和看到的任何地方——从粒子物理微观领域到宇宙大尺度结构这样的宇观结构。

尽管有这么多引以为傲的成果，但我们对宇宙的了解也不是完美无缺的。我们无法看到、触摸或感受到我们在宇宙中测量到的85%的引力来源。神秘的暗物质，除了它对我们可见物质的引力，仍未被真正探测到，它可能是由我们尚未发现或识别的奇异粒子组成。然而，少数天体物理学家并不同意，而且认为并不存在暗物质——你只需要修改牛顿万有引力定律，他们认为简单地在方程中加入一些成分，一切都会解决的。

也许有一天我们会知道，牛顿的万有引力定律确实需要调整。那没关系，这事儿已经发生过一次了。爱因斯坦在1916年发表的广义相对论在某种方式上扩展了牛顿的引力定律，从而使之也适用于极大质量的物体。牛顿本人的万有引力定律在这个扩展后的领域中失效了，这是他当时所不知道的领域。我们由此得到的教训是，我们对定律的信心，取决于测试和验证条件的范围。适用的范围越广，定律在描述宇宙时就越有说服力和解释力。对于日常所见的一般引力条件，牛顿定律是很有效的。它在1969年把我们带到月球上，并安全地返回地球。对于黑洞和宇宙大尺度结构，我们需要广义相对论。如果你把低质量和低速度代入爱因斯坦的方程式，它们实际上（或者更确切地说是在数学上）又变成了牛顿方程——在我们对已有定律的持续理解中，我们对物理定律普适性的信心又进一步增强了。

****

对科学家来说，物理定律的普适性使宇宙成为一个出奇简单的所在。相比之下，人性——心理的领域——是无限而不可捉摸的。在美国，地方学校的董事会就在课堂上讲授的科目进行投票。在某些情况下，选票是根据文化、政治或宗教潮流的一时冲动而投下的。在世界各地，不同的信仰体系会导致政治上的差异，而这些分歧并非总能和平解

决。物理定律的力量和美在于它们无处不在，无论你是否选择相信它们。

换句话说，除了物理定律之外，其他的都只是个人观点。

不是科学家们不争论。我们也争论，有很多争论。但当我们这样做时，我们通常表达的是一些最前沿的观点，这些观点通常涉及对不充分数据的解读。无论何时何地，只要讨论中能够援引物理定律，那么这时的辩论保证是简短的：不对，你关于永动机的想法永远无效，它违反了久经考验的热力学定律；不行，你无法建造时间机器让你回到你出生之前杀死你的母亲，这违反因果律；如果不违反动量定律，无论是否坐在莲花台上，你都不能无缘无故地悬浮在地面之上[4]。

在某些情况下，关于物理定律的知识可以让你有信心面对粗暴无礼的人。几年前，我在加州帕萨迪纳（加州理工学院所在地）一家甜品店要了一杯热可可，当然是加掼奶油的。当可可送到餐桌上来时，我却看不到奶油的痕迹。当我告诉服务员我的可可没加奶油时，他一口咬定我看不到是因为奶油沉到了杯底。但是，掼奶油的密度很低，会漂浮在人们喝的所有饮料之上。所以我给侍者两个可能的解释：要么有人忘了给我的热可可加掼奶油，要么是在他的餐馆里有另外一套物理学普适定律。他不服气，挑衅地拿来了一块掼奶油，以证明他的断言。结果奶油上下摇晃了几下，就上升到可可上面，稳稳地漂浮着。

你还需要什么更好的证据来证明物理定律的普适性吗？

03　要有光

Let There Be Light

大爆炸之后，宇宙的主要议程是膨胀，原本在空间中集聚的能量被不断稀释。随着时间的推移，宇宙变得越来越大、温度越来越低、亮度越来越暗。此时物质和能量以一种不透明汤的形式共存，其中电子不断与无处不在的光子发生散射。

38万年里，事情一直这样进行着。

在这个宇宙早期时代，光子运动不了多远就会撞到电子。在那时候，如果你的任务是看到广袤的宇宙，你根本就看不到。你会发现任何光子都在碰到你1纳秒或1皮秒之前就被电子撞飞了[5]。因为携带信息的光子到达你的眼睛之前走过的最大距离极其之短，你往任何方向看去，整个宇宙都只是一团不透明的浓雾。太阳和其他恒星内部也是如此。

随着温度的下降，粒子的移动速度越来越慢。就在那时，当宇宙的温度第一次降到炽热的3000开尔文以下时，电子的速度就会减慢，刚好可以被路过的质子捕获，从而将完整的原子带入这个世界。这使以前被骚扰的光子获得自由，得以在没有间断的路径上穿越宇宙。

这个“宇宙背景”是热烈耀眼的早期宇宙残余光的化身，而宇宙背景的温度，可以从主要的光子在哪一个光谱波段推断出来。随着宇宙继续冷却，在光谱的可见光部分的光子，因为宇宙不断膨胀而逐渐失去能量，变成了红外光子。虽然那些可见光光子变得越来越弱，但仍然以光子的形式存在。

在光谱中，红外光之下是什么波段呢？从光子获得自由以来到现在，宇宙尺度已经膨胀了1000倍，因此，宇宙背景也相应地冷却到当时温度的1/1000。所有可见光光子已经降至那个时代能量的1/1000。它们现在是微波，因此我们现在给它取了一个名号叫作“宇宙微波背景”（cosmic microwave background，简写为CMB）。它将在微波波段保持500亿年，那之后的天体物理学家们将会叫它为“宇宙射电波背景”（cosmic radiowave background）。

当物体被加热时，它会在光谱的所有波段都辐射光，但这种辐射总

会在某个特定能段处产生峰值。对于仍然使用发光金属丝的家用电灯，灯泡发光的峰值在红外线波段。人眼并不能看见红外线，而只有感受到落在皮肤上的热量时，我们的感官才能觉察到它。所以，这份最大的能量辐射恰恰是白炽灯泡作为可见光光源的低效之处。先进照明技术带来的LED革命创造了纯净的可见光，而不在看不见的波段部分浪费电力。这就是为什么你可以在灯泡包装上看到似乎疯狂的句子“7瓦LED相当于60瓦白炽灯”。

作为曾经发光极亮东西的残余物，CMB的光谱形状符合我们对正在冷却的发光体的预期：尽管它的峰值在光谱某个波段，但在光谱其他部分仍有辐射。在这种情况下，除了峰值处的微波，CMB也发射一些射电波和越来越少的微量高能光子。

在20世纪中期，宇宙学这个分支还没有多少数据。在数据稀少的地方，充满智慧和希望的相互竞争的理念就会蓬勃发展。20世纪40年代，俄裔美国物理学家乔治·伽莫夫（George Gamow）和同事们预测了CMB的存在。这些想法的基础来自比利时物理学家兼牧师乔治·勒梅特（Georges Lemaître）在1927年的工作，他被公认为“大爆炸宇宙学理论之父”。但正是美国物理学家拉尔夫·阿尔弗（Ralph Alpher）和罗伯特·赫尔曼（Robert Herman）在1948年首次估计了宇宙背景温度应该是多少。他们的计算基于三个基础：（1）爱因斯坦在1916年发表的广义相对论；（2）埃德温·哈勃在1929年发现的宇宙膨胀；（3）此前在实验室里以及在“二战”期间制造原子弹的曼哈顿计划发展出来的原子物理学。

赫尔曼和阿尔弗当时计算和提出的宇宙温度为5K。嗯，现在看来这明显是错误的。这些微波的精确测量温度是2.725K，有时写为2.7K，如果你不乐意写小数，把宇宙的温度四舍五入写成3K也可以。

让我们暂停片刻。赫尔曼和阿尔弗把从实验室里刚刚得到的原子物理学，应用于早期宇宙中的假想环境当中。由此，他们向后推演数十亿年，计算出宇宙今天应该是什么温度。他们的预测与正确答案相差很小，这是人类洞察力的惊人胜利——他们原本的计算结果可能会误差十倍百倍，甚至预测到根本不存在的东西。在评论这一壮举时，美国天体

物理学家J.理查德·戈特（J.　Richard　Gott）指出：“预测宇宙背景的存在，然后得到的温度误差在两倍以内，就像预测一个直径15米的飞碟将降落在白宫草坪上，实际是来了一个8米的。”

****

第一次对宇宙微波背景的直接探测是在1964年，由贝尔电话实验室研究部门的美国物理学家阿诺·彭齐亚斯（Arno　Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert　Wilson）无意中进行的。在20世纪60年代，每个人都知道微波，但几乎没有人拥有探测它们的技术。贝尔实验室是通信行业的先驱，它为这个目的研制了一种结实的喇叭形天线。

但首先，如果你要发送或接收信号，你不希望有太多的干扰源。彭齐亚斯和威尔逊试图测量干扰他们接收机的背景微波，从而利用这个光谱波段进行干净无噪声的通信。他们不是宇宙学家。他们是建造微波接收机的技术奇才，他们也不知道伽莫夫、赫尔曼和阿尔弗的预测。

彭齐亚斯和威尔逊显然不是在寻找宇宙微波背景，他们只是试图为美国电话电报公司打开一个新的通信渠道。

彭齐亚斯和威尔逊进行了实验，并从他们的数据中减去所有他们可以识别的、来自地球和宇宙的已知干扰源，但其中一部分信号总是存在，而他们就是找不到消除它的方法。最后，他们检查了喇叭形天线的内部，看到有鸽子在那里筑巢。

因此，他们担心“一种白色的介电物质”（鸽子粪便）可能是与此信号有关，因为无论探测器指向何方，他们总能检测到它。在清洗了“介电物质”后，干扰略有下降，但残留的信号仍然存在。他们在1965年发表的论文就是关于这种无法解释的“多余的天线温度”。

与此同时，由罗伯特·狄克（Robert　Dicke）率领的普林斯顿大学一组物理学家正在建造专门用于寻找CMB的探测器。但是他们没有贝尔实

验室的资源，所以他们的工作慢了点。当狄克和他同事们听说彭齐亚斯和威尔逊的工作时，普林斯顿团队完全了解他们观察到的多余的天线温度是什么。一切都吻合，特别是温度本身，以及信号来自天空的各个方向。

1978年，彭齐亚斯和威尔逊因为他们的发现获得了诺贝尔奖。2006年，美国天体物理学家约翰·C. 马瑟（John C. Mather）和乔治·F. 斯穆特（George F. Smoot）又因为在更宽的光谱范围之上观测到了CMB，把宇宙学从聪明的、不成熟且尚未经受检验的想法，带入到精确的实验科学范畴而分享了诺贝尔奖。

****

因为光从宇宙遥远的地方到达我们这里需要时间，如果我们向太空深处眺望，实际上是在从时间上往回看。因此，如果我们的目光能够看到很远很远某个星系的智慧生物正在测量宇宙背景辐射的温度，那么他们得到的读数应该远高于2.7K，因为他们是生活在一个更年轻、更小，也比我们更热的宇宙。

实际上，你可以实测来检验这个假设。分子氰（一种碳氮化合物，分子式为CN，曾经用作处决杀人犯的毒气）暴露在微波下会被激发。如果过去微波比我们现在的CMB更热，它们就会使这种分子激发到更高能量。在大爆炸模型中，遥远的年轻星系中的氰，与我们银河系里的相比，沐浴在更温暖的宇宙背景中。这正是我们所观察到的。

这种情况是编造不出来的。

为什么这些事情如此有趣？宇宙直到大爆炸后38万年都是不透明的，所以即使你一直坐在前排中央座位上，你也不可能看到物质的形成。你不可能看到星系团和宇宙巨洞从哪里开始形成。只有当作为信息载体的光子开始能够在整个宇宙中畅通无阻地旅行，我们才能够看见宇宙发生的某些事情。

每个光子跨越宇宙之旅开始的地方，是撞击到曾经阻碍它的最后一个电子之处——这被称为“最后散射点”。随着越来越多的光子逃离碰撞，它们形成了一个不断膨胀的“最后散射面”，深度约12万光年。这个面也是宇宙中所有原子诞生之处：电子与原子核结合，释放出的能量以光子的形式奔向浩渺的红色远方。

此时，宇宙中的一些区域已经开始通过它们的引力相互吸引，聚集成团。与其他那些尚未开始聚集的区域相比，光子通过与这些区域中的电子最后散射，从而使得区域温度相对略低。在物质积聚的地方，引力增强，使得越来越多的物质聚集起来。这些区域成为形成未来超星系团的种子，而其他区域则相对较空。

当你详细地绘制宇宙微波背景时，你会发现它不是完全平滑的。与平均值相比，有些斑点略热，有些斑点则稍冷。通过研究CMB温度各处的差异——也就是说，通过研究最后散射面中的模式——我们可以推断出在早期宇宙中物质的结构和成分。为了弄清星系、星系团和超星系团是如何产生的，CMB是我们最好的探针，它是信息丰富的时间胶囊，使天体物理学家能够反过来重建宇宙的历史。研究它的模式某种程度上就像在做宇宙“颅相学”，因为我们现在就在分析婴儿宇宙的头骨上的“凸起”。

当受到其他各种观测资料的限制时，CMB能够使你解码宇宙各种基本性质的信息。比较冷热区域的大小和温度分布，你可以推断出当时的引力强弱，以及物质积累的速度有多快，同时让你推断出宇宙中存在多少普通物质、暗物质和暗能量。从这里，就可以直接判断宇宙是否会永远膨胀。

****

普通物质就是构成我们自身的物质。它有引力，能与光相互作用。暗物质是一种神秘物质，它具有引力，但不以任何已知方式与光发生相

互作用。暗能量是在宇宙真空中存在的神秘压力，它的作用方向与引力相反，迫使宇宙膨胀速度比没有它时变得更快。

宇宙“颅相学”检验让我们知道宇宙是如何演化的，但宇宙大部分是由那些我们一无所知的东西组成的。尽管今天我们还有大量的未知领域，但跟以往不同的是，宇宙学还是有可靠的科学依据的，因为CMB揭示了宇宙早期曾经走过的那扇门。在那个时间点上发生了有趣的物理过程，我们已经了解了在光子获得自由之前和之后的宇宙状况。

宇宙微波背景这个简单的发现，使宇宙学超越了神话猜想。而且正是对宇宙微波背景准确而详细的测量使宇宙学变成了现代科学。宇宙学家们相当自负，如果你的工作是推断“是什么让宇宙得以存在”，你怎么会不自负呢？但如果没有数据，他们的解释只是假设。现在，每一次新的观察，每一点数据，都挥舞着一把双刃剑：它使宇宙学得以在享有其他科学成果的基础之上蓬勃发展，但它也会筛选在数据缺乏时期提出来的学说，指出哪些是对的，哪些是错的。

任何学科只有经历了这个过程，才会发展成熟。

04　在星系之间

Between the Galaxies

在宇宙组成的宏大统计中，星系显然是被计算在内的。最新的估计表明，可观测宇宙中可能包含1000亿个星系。明亮美丽，密布繁星，星系装饰着黑暗的虚空，如夜间广袤国土上的城市。但太空的空究竟有多空？（城市之间的乡野有多空旷？）仅仅因为星系光彩夺目，就让我们相信其他的东西都不重要吗？不然。宇宙星系之间仍然可能隐藏着难以探测的东西。也许那些东西比星系本身更有趣，或者对宇宙演化来说比星系更为重要。

我们自己的旋涡星系——银河系，在地球上抬眼望去，形状就像泼洒在夜空中的牛奶。事实上，银河系（galaxy）这个词便来源于希腊文“奶水状的”（galaxias）。离我们最近的一对星系邻居（有60万光年远），形状都是既小又不规则。费迪南德·麦哲伦在1519年那次著名的环球航行的船长日志里记录下了这两个天体。为了纪念这位探险家，我们称它们为大、小麦哲伦星云，它们主要是在南半球可看见，就像是繁星密布的天空上的一对云斑。比我们银河系要大的最近的星系位于200万光年之外，比构成仙女座的那些恒星距离要更远。这个旋涡星系在历史上被称为仙女大星云，在某种程度上说是银河系的一个更大、更明亮的孪生兄弟。请注意，以上每个星系的英文名称，最初都没有指出其中存在恒星：银河、麦哲伦星云、仙女大星云。这三个名字都来自望远镜发明之前，那时我们还未能分辨出来它们是由恒星组成的。

****

如第9章我们将要详述的，如果不是受益于那些在多个光谱波段运行的望远镜，我们可能仍然会宣称星系之间的太空里空无一物。在现代探测器和现代理论的帮助下，我们探索了我们的宇宙乡村，揭示了各种难以捉摸的东西：矮星系、速逃星（迅速离开恒星诞生区的年轻恒星）、即将爆炸的速逃星、温度高达百万开尔文发射X射线的气体、暗物质、微弱的蓝色星系、无处不在的气体云、超高能带电粒子，以及神秘的量子真空能。有了这样一个列表，人们可以说，宇宙中所有的乐趣

都发生在星系之间，而不是它们的内部。

在所有曾被可靠地调查过的空间区域里，矮星系的数量要比大星系多得多，比例超过10比1。在20世纪80年代初，我写的第一篇关于宇宙的文章名为《银河系和七个小矮人》，指的是银河系附近矮小的家庭成员。从那时起，本地矮星系的总数已经从七个增加到了几十个。虽然正统的星系含有数千亿颗恒星，但矮星系里恒星数量少到只有100万，也就是说它们被探测到的难度要大十万倍。这也就难怪它们仍然陆续在我们的眼皮底下被不断发现。

不再产生恒星的矮星系图像看起来像是烦人的微小污迹。那些仍在形成恒星的矮星系都是不规则形状的，坦率地说，看起来很对不起观众。矮星系有三个特点让你很难注意到它们：它们很小，所以当壮观的旋涡星系争夺你的注意力时，它们很容易被忽略；它们很暗，因此在许多星系巡天中由于在预期光度水平之下而被忽略；它们内部的恒星密度很低，所以与地球夜间大气层和其他周围的发光源相比，它们对比度很差。这一切都是真的。但是，由于矮星系的数量远超过“正常”星系，也许我们关于“正常”的定义需要修正。

你会发现大多数（已知的）矮星系游荡在更大的星系附近，就像卫星一样绕着大星系转。两个麦哲伦星云是银河系的矮星系家族的一部分。但卫星星系的命运可能是相当危险的。大多数计算机模型显示，它们的轨道会逐渐衰减，最终导致不幸的矮星系被撕裂，然后被主星系吃掉。在过去的十亿年中，银河系至少参与了一次这类“同类相食”行为，当它吃下了那个矮星系的时候，被消解的残骸可以被看成是在轨道上绕银河系中心旋转的一股恒星流，即位于人马座远方的群星。该系统被称为人马矮星系，但可能更应该称之为银河系的一顿“午餐”。

在星系团的高密度环境中，两个或两个以上的大星系经常发生碰撞，留下的是一场大混乱：旋涡结构被扭曲到无法识别，由于气体云的猛烈碰撞而新爆发出许多恒星形成区，还有刚刚逃离了两个星系引力的成千上万的星星四处散落。一些恒星重新组合成可以称为矮星系的斑点。其他恒星仍在漂流。大约10%的大星系都显示存在与另一大星系的引力碰撞的证据——在星系团中这一比例可能会高出5倍。

有这么多的混乱，有多少星系残骸渗入了星系际空间，特别是在星系团之内？没有人确切知道。测量是非常困难的，因为孤立的恒星太暗无法单独探测到。我们必须依靠探测所有恒星的星光联合形成的微光才能发现它们。事实上，对星系团的观测发现了存在于星系之间的这类光晕，这表明在那些星系之间可能有许多无家可归的流浪恒星，而且可能与星系本身的恒星数量一样多。

为这项讨论增添新料的是，我们发现了（并不是刻意寻找的）有超过一打超新星爆炸是远离我们曾推测的“宿主”星系的。在普通星系中，对于每颗以这种方式爆炸的恒星来说，都相应有10万到100万颗恒星不是如此表现的，所以孤立的超新星可能暴露了一大类尚未被发现的恒星。超新星是把自己炸成碎片的恒星，在这个过程中，它们的光度暂时（超过几周时间里）会增加10亿倍，使它们在整个宇宙中都可见。虽然十几个无家可归的超新星是一个相对较小的数字，但可能尚待发现的还有很多，因为大多数超新星搜索系统监测的是已知星系，而不是太空里的空旷之地。

****

对于星系团来说，包含的内容还不止它们的成员星系和那些任性的流浪恒星。灵敏的X射线望远镜的测量结果显示，星系团之内的空间充满了温度高达数千万开尔文的气体。这种气体是如此炽热，以至于它们发出了强烈的X射线。富含气体的星系在运动中通过这种介质之后，自身拥有的气体被剥离，迫使它们丧失产生新恒星的能力。这可以解释X射线望远镜的观测结果。但是当你计算这种被加热的气体呈现的总质量时，它超过了大多数星系团中全部星系质量总和的十倍之多。更糟糕的是，星系团里暗物质泛滥成灾，暗物质的质量碰巧又比星系团自身的其他一切质量大十倍！换言之，如果望远镜观测到的是质量而不是光，那么我们所珍视的团内星系就会表现为在巨大的引力球中微不足道的亮点。

在太空其他地方，在星系团之外，有一大类星系在很久以前就兴旺了。正如之前指出的，观看宇宙类似于地质学家查看纵深的沉积地层，展现在视野中的是岩石形成历史。宇宙中的距离是如此之大，以至于光到达我们经历的时间可以是几百万甚至数十亿年。当宇宙是它的当前年龄的一半时，一类非常蓝且非常暗淡的中等尺度星系繁荣起来。我们能看到它们。它们的光从很久以前传来，代表了非常非常遥远的星系。它们的蓝色光辉来自刚形成的大质量、高温度、高亮度、短寿命的恒星。那些星系之所以暗淡微弱，不仅因为它们距离遥远，而且因为它们内部明亮恒星的密度很稀薄。就像曾经存在又消失的恐龙，留下了鸟类作为它们仅有的现代后裔，那些微弱的蓝色星系已经不复存在，但据推测在今天的宇宙中仍有类似的天体。它们的那些恒星都燃烧完了吗？它们是否已成为散落在整个宇宙中的无形尸体？它们演化成了我们今天熟悉的矮星系了吗？还是它们都被更大的星系吃掉了？我们不知道。但它们在宇宙历史的时间线上的位置是确定的。

既然大星系之间还有这么多东西，我们就会想，其中一些肯定会挡住我们看向宇宙更远处的视线。这是一个关于宇宙中最遥远天体的问题，比如类星体。类星体是超级明亮的星系核，它的光在到达我们的望远镜之前一般已经在太空中穿行了数十亿年。作为非常遥远的光源，它们是探测类星体与我们之间是否存在中间天体的理想实验品。

果然，当你把类星体的光分解成它的成分颜色，揭示出光谱，就会发现，这里面充满了星系际气体云存在的证据。每一个已知的类星体，无论它在天空的什么位置被发现，都显示了散落在漫长时空里的几十个孤立氢云的特征。这种独特的星系际天体类型是在20世纪80年代首次被确认的，并且至今仍是天体物理学研究的活跃领域。它们从哪里来？它们包含多少质量？

已知的每个类星体都揭示了这些氢云的特征，所以我们得出结论，氢云在宇宙中无处不在。而且，正如所料，类星体越远，光谱中就会出现更多的氢云。一些探测到的氢云（少于百分之一）只是我们的视线经过的普通旋涡星系或不规则星系中所含的气体。当然，你会料到至少有一些类星体会位于那些太遥远而无法探测到的普通星系的后面，但其余的吸收体明确无误地是又一类宇宙天体。

同时，类星体的光通常经过的太空区域也包含巨大的引力源，会对类星体的形象造成灾难性破坏。这些引力源往往很难被发现，因为它们可能是普通物质组成的，只是太暗也太遥远了，不过它们也可能是暗物质区域，比如位于星系团中心和周围的那些。无论是哪种情况，哪里有质量，哪里就有引力。根据爱因斯坦的广义相对论，有引力的地方就有弯曲的空间。空间弯曲的地方，就类似玻璃透镜，会改变穿过其中的光的路径。事实上，遥远的类星体或整个星系都能够被那些碰巧位于地球望远镜视线上的天体形成“透镜效应”。根据那些“透镜”本身的质量和视线方向上的几何形状不同，透镜效应可以放大、扭曲，甚至将背景光源分成多个图像，就像玩哈哈镜一样。

宇宙中（已知）最遥远的天体之一不是类星体，而是一个普通的星系，它微弱的光被相关的引力透镜显著地放大了。我们今后可能需要依靠这些“星系际望远镜”来观测普通望远镜无法触及的地方，从而发现宇宙中更加遥远的天体。

****

星系际空间虽然是很吸引人的所在，但是如果你选择去那里，那对你的健康而言是非常危险的。让我们忽略因为你温暖的身体试图与3K的宇宙温度达到平衡而把你冻死的事实，让我们忽略由于缺乏大气压力会导致你窒息、血细胞爆裂的事实。这些都是很普通的危险。从非寻常角度来说，星系际空间经常被超级高能、超高速的带电亚原子粒子穿透。我们称它们为宇宙射线。其中最高能粒子携带的能量是世界上最大的粒子加速器所能产生能量的1亿倍。它们的起源仍然是一个谜，但这些带电粒子的大部分是质子，即氢的原子核，并以99.9999999999999999999%的光速移动。值得注意的是，这些亚原子粒子单个个体携带的能量就足够从球场中任何地方把高尔夫球打进洞中。

也许，星系之间（也包括之中）的真空里最奇异的事情是，它是虚

粒子的沸腾海洋——无法探测的物质和反物质对突然出现又消失。这一奇特的量子物理学预言被称为“真空能量”，它表现为向外的压力，作用与引力相反，在完全没有物质的情况下也依然蓬勃发展。正在加速的宇宙（暗能量能力的展现），可能就是被这种真空能量驱动的。

是的，星系际空间是，并且将永远是个热闹的所在。

05　暗物质

Dark Matter

引力是我们最熟悉的自然力，它同时为我们提供了自然界中最容易理解的和最难以理解的现象。它让千年以来最聪明也最有影响力的人艾萨克·牛顿认识到，引力神秘的“超距作用”产生于每一点物质的自然效应，这种任何两个物体之间的吸引力可以用一个简单的代数方程来描述。20世纪最杰出、最有影响力的人爱因斯坦认识到，并且证明，我们可以把描述引力的“超距作用”更准确地描述为：由物质和能量任意组合所产生的时空结构中的弯曲。

爱因斯坦证明牛顿的理论需要一些修改才能准确地描述引力——例如，当光线经过一个巨大的天体时会产生多大的弯曲。虽然爱因斯坦的方程比牛顿的更为精致，不过它们都很好地容纳了我们所认识和热爱的日常物质，也就是我们可以看到、触摸、感受、嗅闻，并且偶尔品尝的那些物质。

我们不知道这个天才序列里的下一个是谁，但将近一个世纪之后，我们如今在等某人来告诉我们，为什么我们在宇宙中测量到的大部分引力（大约85%），产生于并不与“我们的”物质或能量发生相互作用的物质或能量。也有可能，那些多余的引力根本不是来自物质和能量，而是表现为其他某种概念性的东西。无论是何种情况，我们基本上都是一无所知。我们发现，关于这个“失踪的质量”问题，比起1937年它第一次被美国籍瑞士天体物理学家弗里茨·兹威基（Fritz　Zwicky）全面分析时，我们今天并没有更接近答案。兹威基在加州理工学院任教超过40年，他这个人能用丰富多彩的表达方式把他对宇宙深刻的洞察表现出来，不过同时，他与同事交恶的能力也令人印象深刻。

兹威基研究了一个庞大星系团中那些单个星系的运动，这个星系团要比我们银河系本地的恒星远得多，位于后发座方向（这个星座的意思是古埃及“伯伦尼斯王后的头发”）。我们称之为后发星系团，它是一个成员极多的孤立的星系集合体，离地球大约3亿光年。它的上千个星系环绕着星系团的中心运行，就像蜜蜂簇拥着蜂巢一样在各个方向运动。利用几十个星系的运动作为将整个星系团结合起来的引力场的示踪物，兹威基发现其中星系的平均速度大得惊人。由于更大的引力会导致被它们吸引的物体具有更高的速度，兹威基推断出后发星系团具有巨大的质

量。作为对该估计真实性的检查，你可以把所看到的每个成员星系的质量加起来。即使后发星系团位居宇宙中最大规模的星系团之列，它也没有足够多的可见星系来解释兹威基观察和测量到的巨大速度。

这情况有多糟？我们已知的万有引力定律让我们失望了吗？当然，它在太阳系中肯定有效。牛顿已经证明，你可以推导出，跟太阳在某个距离上保持稳定轨道的行星，必须具有一个特定的速度，否则它就会落向太阳或者上升到更远的轨道上。计算表明，如果我们把地球当前的轨道速度增加（1.4142……）倍，我们这个行星就达到了“逃逸速度”，就会彻底离开太阳系。我们可以将同样的推理应用于更大的系统，比如我们的银河系，作为对来自所有其他恒星引力的反应，星系里的恒星各自在其轨道上运动；或者在星系团中，每个星系同样感受到其他星系的引力。在这种精神感召下，爱因斯坦在他写满公式的笔记本的一页上，写了一首赞颂艾萨克·牛顿的押韵诗（在德语中韵律感更强）：

仰望星辰探真理，

大师思想传我辈。

繁星点点默无言，

但循牛顿理论行。

（Look unto the stars to teach us

How the master’s thoughts can reach us

Each one follows Newton’s math

Silently along its path）

当我们依此检验后发星系团时，正如兹威基在20世纪30年代所做的那样，我们发现它的成员星系运动速度比星系团的逃逸速度更快。这个

星系团早就应该迅速分解了，几百万年之后，它那密如蜂巢的结构就不会留下一丝痕迹。但是这个星系团已经有100多亿年的历史了，几乎和宇宙本身一样古老。如此一来，就诞生了天体物理学中至今最长久的未解之谜。

****

在兹威基完成这项工作之后的几十年里，其他星系团里也发现了同样的问题，所以后发星系团不能被认为是个例。那么我们应该责备什么或怪罪谁呢？牛顿？我不会的，起码现在不会。现在他的理论已经被检验250年了，而且通过了所有的测试。爱因斯坦？不会。星系团的引力虽然难对付，但仍然不够强，不需要动用广义相对论的大锤，而且当兹威基做研究时，广义相对论才发表了20年。可能束缚后发星系团所需的"失踪的质量"确实存在，只是以某种未知的、不可见的形式存在。今天，我们已经给它取了"暗物质"这一名号，这个名字没有断言任何东西是缺失的，但仍然暗示必然存在某种新型物质，尚待被发现。

当天体物理学家们已经开始接受星系团中神秘的暗物质之时，它又一次抬起了它隐形的脑袋。1976年，如今已辞世的薇拉·鲁宾（Vera Rubin）当时是华盛顿卡内基研究所的天体物理学家，她在旋涡星系中发现了类似的质量异常。在研究恒星环绕星系中心的速度时，鲁宾首先发现的是符合她所期望的东西：在每个星系的可见盘中，离中心较远的恒星比离中心较近的恒星的速度要快。对于较远的恒星，在它们自身与星系中心之间有更多物质（恒星和气体），使它们具有更快的轨道速度。然而，在星系的发光盘之外，人们仍然可以找到一些孤立的气体云和明亮的恒星。利用这些天体作为星系最明亮区域之外的引力场的示踪物，在可见物质不再增加的那些区域，鲁宾发现它们的轨道速度本应该随着距离的增加而下降的，但实际上仍然很快。

这些太空区域——每个星系的偏远地区——大部分是空无一物，这些地方含有太少的可见物质，无法解释示踪体异常的高轨道速度。鲁宾

正确地推断，在每个旋涡星系远远超出可见边缘的那些遥远区域，必须存在某种形式的暗物质。多亏鲁宾的工作，我们现在称这些神秘地带为“暗物质晕”。

这个晕的问题就存在于我们的眼皮底下，就在银河系中。从星系到星系，从星系团到星系团，天体可见物部分的质量估算值与同一天体整体引力范围内的质量估算值之间的差异，从几倍到几百倍不等。在整个宇宙中，这一差异的平均值为6倍，即宇宙里暗物质的引力大约是所有可见物质总引力的6倍。

进一步的研究表明，暗物质不可能是由发光较少或不发光的普通物质组成。这一结论取决于两条推理。首先，我们可以用近乎肯定的方法消除所有看似熟悉的候选者，就像警察让嫌疑犯列队接受辨认一样。暗物质能在黑洞中存在吗？不，我们认为我们会从黑洞对附近恒星的引力效应中发现那些黑洞。可能是黑色星云吗？不，它们会吸收星光，或以其他方式与来自它们身后的星光相互作用，真正的暗物质不会发生这样的情况。它可能是星际（或星系际）的流浪行星、小行星和彗星吗？所有这些天体都不会自己发光。很难相信宇宙制造的行星在质量上是恒星的6倍多。那将意味着星系中每颗恒星都有6000颗木星，或者更糟的是，有200万颗地球。例如，在我们自己的太阳系中，太阳以外所有的东西加起来还不到太阳质量的千分之二。

对于暗物质的奇异性质，更直接的证据来自宇宙中氢和氦的相对量。这些数字一起提供了早期宇宙留下的宇宙指纹。与事实非常接近的是，大爆炸后的前几分钟的核合成，导致了每10个氢核（它们本身就是质子）就有一个氦核。计算表明，如果大部分暗物质参与了核合成，那么相对于氢，宇宙中应该会有更多的氦。由此我们得出结论，大部分的暗物质（也就是宇宙中的大多数）并不参与核聚变，这就表明它并不具有“普通物质”的资格，普通物质本质在于能够参与原子力和核力作用，从而形成我们所知道的物质。对宇宙微波背景的详细观测能够对这个结论进行独立检验，证实了这个结论：暗物质和核合成无关。

因此，正如我们所能理解的那样，暗物质并不是碰巧由黑暗物质构成的那么简单。相反，它完全是另一种东西。暗物质遵守与普通物质一

样的引力规律，对普通物质存在引力，但它并没有能让我们探测到它的其他作用。当然，由于我们并不知道暗物质是什么，这一点妨碍了我们的分析。如果所有的质量都对应有引力，那么所有的引力都对应有质量吗？我们不知道。也许对物质来说这样没有错，但对引力我们还并不理解。

****

不同天体环境里，暗物质和普通物质之间的比例变化很大，在星系和星系团这样的大型天体中是最为明显的。对于最小的天体，如卫星和行星，并不存在物质和引力间的差异。例如，地球表面的引力可以完全由我们脚下的东西来解释。如果你在地球上超重，不要责怪暗物质。暗物质既不影响月球绕地球公转的轨道，也不影响太阳周围行星的运动——但正如我们已经看到的，我们确实需要它来解释星系中心周围恒星的运动。

在星系尺度上是否存在不同的引力机制？可能不是。更可能的是，暗物质是由我们尚未探测到其本质的物质组成，它比普通物质更分散。否则，我们将探测到分布在宇宙间的由暗物质聚集成的大块引力团——如暗物质彗星、暗物质行星、暗物质星系。据我们目前所知，事情不是这样的。

我们知道的是，我们在宇宙中所爱的东西——组成恒星、行星和生命的物质——只是宇宙这块蛋糕上薄薄的一层糖霜，是在浩瀚的却又看似什么都没有的宇宙海洋里漂浮着的一些微小浮标。

****

在大爆炸后的前50万年——仅仅是在140亿年宇宙历史中的短暂一瞬，宇宙中的物质已经开始凝聚成为将会发育成星系团和超星系团的小团块。但在接下来的50万年里，宇宙的尺度将会翻番，而后还将继续增长。决定宇宙发展可能性的是两个相互竞争的效应：引力想使物质凝聚，但膨胀试图稀释它。如果你做下计算，你会很快发现，以普通物质自身的引力无法赢得这场战斗。它需要暗物质的帮助，没有暗物质我们就会生活在——实际上我们就不可能活着——一个没有任何结构的宇宙里：没有星系团，没有星系，没有恒星，没有行星，也没有人。

我们需要多少来自暗物质的引力？是相当于普通物质本身所提供的6倍。正好就是我们在宇宙中测量到的数量。这一分析并没有告诉我们暗物质是什么，只有暗物质的效应是真实的，而且，无论如何，你都无法把它归于普通物质。

****

所以暗物质跟我们亦敌亦友。我们不知道它是什么。有点烦人。但在计算中我们迫切需要它才能得出对于宇宙的准确描述。当我们的推断必须基于我们不理解的概念时，科学家通常是不舒服的，但是如果我们不得不这样做的时候，我们就必须这样做。暗物质不是我们试图驾驭的第一匹野马。例如，在19世纪，科学家们测量了太阳的能量输出，并证明了它对我们的季节和气候的影响，而这远在任何人知道太阳能量是由核聚变产生的之前。现在看起来很可笑，但当时最好的想法是，太阳是一大块燃烧的煤炭。也是在19世纪，我们观测恒星时获得了它们的光谱，并对它们进行了分类，这也远在20世纪量子物理学产生之前，后来量子物理才让我们了解了这些光谱的本质，为什么它们看起来是这样的。

无情的怀疑论者可能会把暗物质假设与19世纪提出、如今已经被否定的“以太”做对比，“以太”是光在其中运动的、充满真空的、没有质量的透明介质。直到1887年由凯斯西储大学的阿尔伯特·迈克尔逊（Albert

Michelson）和爱德华·莫雷（Edward Morley）在美国克利夫兰市做的一个著名实验给出否定结果之前，科学家们都断言以太必定存在，即使没有一丝一毫的证据支持这一假设。科学家们当时认为光是一种波，需要通过一种介质来传播光的能量，就像声音需要空气或其他材料来传播它的声波。但是后来证明光可以很愉快地穿过太空里的真空，不需要用任何媒介来承载它。与由空气振动形成的声波不同，光波是自我传播的能量包，不需要任何帮手。

我们对暗物质的无知与对以太的无知是有根本区别的。以太是因不能理解光的传播而想象出来的一种“占位符”，而暗物质的存在并非来自单纯的推测，而是来自观察到的它的引力对可见物质的实际效应。我们不是凭空发明暗物质的，相反，我们从观察事实推断出了它的存在。暗物质就跟那些围绕着另外一颗“太阳”运行的系外行星一样真实，它们也仅仅是通过对它们的宿主恒星的引力影响而不是从对它们光线的直接观测中发现的。

可能发生的最糟糕的情况是，我们发现暗物质根本不包括物质，而是其他东西。我们是看到了来自另一个维度的力的影响吗？我们是否感觉到了与我们相邻的幽灵宇宙中的物质引力穿过了宇宙膜？如果是这样，我们所在的宇宙可能只是组成“多重宇宙”的无数个宇宙之一。听起来异想天开而且难以置信。但这比第一次提出地球是绕着太阳转的还要疯狂吗？比起太阳只是银河系中上千亿颗恒星之一呢？或者是银河系是宇宙中千亿个星系之一呢？

即使这些幻想式的解释中的任何一个被证明是正确的，也不会改变我们如今成功地使用暗物质的引力来理解宇宙形成和演化这一事实。

其他怀疑论者可能会宣称“眼见为实”——这种生活态度在许多方面都行之有效，包括机械工程、捕鱼，也许还有约会。但它并不是好的科学思路。科学不只是要看到，它是关于测量的，最好是用一些不是你自己眼睛的东西去测量，因为眼睛所见无法摆脱脑中的包袱。而这些包袱往往是一大堆先入为主的观念、僵化的成见和彻头彻尾的偏见。

****

虽然自暗物质的概念提出八十多年以来我们在地球上无法实现直接探测暗物质，但暗物质一直在发挥作用。粒子物理学家相信暗物质是由一类幽灵般的未被发现的粒子组成的，它们与物质通过引力发生相互作用，但在其他方面与物质或光的相互作用非常弱或根本不发生作用。如果你喜欢在物理上赌博，暗物质一定是个很好的下注项目。世界上最大的粒子加速器正试图在粒子碰撞的碎片中制造暗物质粒子。还有特别设计的深埋地下的实验室，正被动地探测来自太空的暗物质粒子。之所以选址于地下，是因为大地可以自然地屏蔽那些已知的宇宙粒子，防止它们进入探测器而被误认为是暗物质。

也许上面这些举措是空忙一场，但“暗物质是一种难以找到的粒子”这个想法还是很值得我们去验证的。对中微子的预测和发现就是一个很好的例子，尽管中微子与普通物质的相互作用非常微弱。来自太阳的中微子的量相当大，在发生核聚变的太阳核心里，每由氢合成一个氦核，就释放出两个中微子，中微子毫无阻碍地逃逸出太阳，在太空的真空里以接近光速穿行，然后就像地球根本不存在一样穿过地球。根据计算，无论白天还是晚上，每一秒钟你身体上的每一平方厘米都有1000亿个来自太阳的中微子穿过，但根本不会与你身体的原子发生相互作用。尽管如此不可捉摸，但在特殊情形下，中微子仍然是可以被阻止的。如果你阻止了一个粒子，就说明你已经探测到它了。

暗物质粒子可以通过类似的极其罕见的相互作用来显示其存在，或者，更令人惊奇的是，它们可能表现为除了强核力、弱核力和电磁力以外的一种力。刚才说过的这三种力，再加上引力，就是宇宙中的四种基本力，能协调所有已知粒子之间的相互作用。所以，情况很明确，等待我们的，要么是通过暗物质粒子的相互作用去发现和控制一种或一类新的作用力，要么就是暗物质跟普通物质也存在相互作用力，只是强度弱得惊人。

因此，暗物质的效应是真实存在的。我们只是不知道暗物质是什么。暗物质似乎不通过强核力相互作用，所以它不能形成原子核。它还

没有被发现通过弱核力进行相互作用，而甚至是难以捉摸的中微子也存在弱相互作用。它似乎并没有与电磁力相互作用，所以它不会产生分子，也不会聚集成致密的暗物质球。它既不吸收、发射光，也不反射或散射光。正如我们从一开始就知道的，暗物质确实会施加引力，而普通物质对此会产生响应。但仅此而已。经过这么多年，我们还没有发现它能做什么别的事情。

现在，我们只能满足于把暗物质作为一个陌生的、隐形的朋友来对待，在宇宙需要我们召唤它的时候请它施以援手。

06 暗能量

Dark Energy

宇宙中有一件事似乎没有引起你足够的担心，近几十年来，天文学家们发现宇宙存在一种神秘的压力，它来自太空里的真空中，其表现与宇宙引力作用相反。不仅如此，这种“反引力”最终将赢得这场宇宙拔河大战，因为未来它会迫使宇宙膨胀以指数形式加速。

对于这种20世纪物理学中最烧脑的思想，要怪就得怪爱因斯坦。

爱因斯坦几乎从未涉足过实验室，他没有检验什么现象或使用精密设备。他是一个理论家，他完善了科学上的“思想实验”。思想实验是用想象参与自然，通过发明一种情境或模型，然后找出一些物理原理的因果关系。

正如爱因斯坦的例子一样，如果物理学家的模型试图代表整个宇宙，那么操纵模型就等于操纵宇宙本身。观测学者们和实验学者们可以到真实宇宙中去寻找该模型预测的现象。如果模型是有缺陷的，或者理论家在他们的计算中犯了错误，观测学者们将发现该模型的预测和现实世界事物运行的方式不匹配。这是对理论科学家的提示，告诉他们要么调整旧模型，要么创建一个新模型。

爱因斯坦的广义相对论，是最强大和应用范围最广的理论模型之一——在你更好地了解它之后，你可以称之为GR（General Relativity）。广义相对论发表于1916年，它描述了宇宙万物在引力作用下运动的数学细节。每隔几年，实验科学家们就会设计出更多的精密实验来测试这个理论，只是为了进一步扩大理论精确性的范围。这一振聋发聩的理论的最新例证出现在2016年，当时引力波被专门为它设计的天文台[6]直接探测到。这些引力波正如爱因斯坦所预言，以光速在时空结构中传播，是由类似两个黑洞碰撞那样严重的引力扰动引起的。

被探测到的正是这样的扰动。第一次发现的引力波是由13亿光年远的两个黑洞碰撞而产生，碰撞发生时，地球上还是单细胞生物的天下。当引力波的涟漪向各个方向荡漾开去的时候，又经过了8亿年，地球上才进化出复杂的生命，包括花朵、恐龙和飞行生物，还有一个叫作哺乳动物的脊椎动物分支。在哺乳动物中，又有一个分支进化出了额叶和复杂的思想，其被称为灵长类动物。灵长类动物的一个分支将会发生一种

促使语言产生的基因突变，而那个分支——智人——将发明农业、文明、哲学、艺术和科学。所有这些都在过去的1万年里发生。最终智人里一位20世纪的科学家将从他的大脑中发明相对论，并预言引力波的存在。整整一个世纪之后，在宇宙中旅行了13亿年的引力波，终于到达了地球，并被人类的科学技术成功地捕获。百年前的预言终于被证实。

没错，爱因斯坦就是这样一个猛人！

****

大多数科学模型在第一次被提出时，往往是不完善的，会留调整空间以更好地适应已知的宇宙。在16世纪数学家尼古拉斯·哥白尼所设想的“日心说”宇宙模型中，行星在完美的圆圈上绕日运行。“绕日运行”这部分是正确的，并且是在“地心说”宇宙模型基础之上的重大进展，但“完美的圆圈”后来被证明有所偏差——所有行星都在环绕太阳的略扁圆形，也就是椭圆形的轨道上运动，甚至这种形状也仅仅是更复杂轨迹的一种近似。哥白尼的基本思想是正确的，这才是最重要的。它只是需要一些调整，使其更准确。

然而，就爱因斯坦的相对论而言，整个理论的创始原则要求所有事情都必须精确地按照预期的那样发生。实际上，在外人看来，爱因斯坦建立了像纸牌一样的房子，只用两三个简单的假设就支撑起了整个建筑。事实上，在1931年爱因斯坦了解到，有一本名为《100个作者反对爱因斯坦》的书，他对此的回应是，如果他是错的，那么只有一个就足够了。

不过，爱因斯坦也为科学史上最令人着迷的错误之一播下了种子。爱因斯坦的新引力方程包括被他称为“宇宙学常数”的一项，他用大写希腊字母Λ（读作Lambda）表示：它在数学上是允许的，但并不是一个必选项，爱因斯坦把它写上去是因为宇宙学常数让他能够得到一个静态宇宙。

在那个时代，人们认为我们的宇宙仅仅是存在着，除此之外，宇宙要是发生任何别的情况，都超出了人们的想象。因此，在爱因斯坦的模型中，这个Λ的唯一作用是抵抗引力，保持宇宙平衡，抵消引力把整个宇宙收缩成一团的趋势。就这样，爱因斯坦发明了一个既不膨胀也不收缩的宇宙，与当时每个人的期望一致。

俄国物理学家亚历山大·弗里德曼（Alexander Friedmann）随后在数学上证明，爱因斯坦的宇宙虽然是平衡的，但却处于一个不稳定状态。就像一个停在山尖上的球，只要受到最轻微的推力，就会从这个或那个方向滚下来，或者像是用笔尖站立的一支铅笔，所以爱因斯坦的宇宙是处于扩张和全面坍缩之间的危险静止状态。此外，爱因斯坦的宇宙学常数是一个新概念，但仅仅因为你给某样东西起一个名字并不足以让它成为实在——爱因斯坦知道这个Λ是具有负引力的，但在物理宇宙中并没有已知的物质与之对应。

****

爱因斯坦的广义相对论彻底背离了以前所有的引力思想。GR并不是建立在牛顿关于引力是一种幽灵般的超距作用（这个结论让牛顿本人也感到不舒服）的基础上，而是认为引力是质量对其他的质量或能量场导致的局域时空曲率的反映。换句话说，质量的集中会导致时空结构的弯曲——真实存在的凹痕。这些弯曲指引着运动质量沿着被称为“测地线”[7]的直线前进，虽然在我们看来测地线像是弯曲的轨迹，我们称之为轨道。20世纪的美国理论物理学家约翰·惠勒（John Wheeler）说得最好，他把爱因斯坦的概念总结成“物质告诉空间如何弯曲，空间告诉物质如何运动”[8]。

最后，广义相对论描述了两种引力。一个是我们熟悉的那种，就像地球和被扔到空中的球之间的引力，或者太阳和行星之间的引力。它还预言了另一种引力——一种与时空本身的真空相关的、神秘的“反引力”。Λ（宇宙学常数）维护了爱因斯坦和他那个时代的每一位物理学家

强烈认为是真实的东西：一个静态的宇宙——一个不稳定的静态宇宙。引入不稳定条件作为物理系统的自然状态，这样做其实违反了科学的信条。你不能断言，整个宇宙是一个特殊的情况，它恰好是平衡的，并且永远如此。在科学史上，从未见过、测量过或想象过像爱因斯坦这样的做法，它也就成了著名的先例。

13年后，在1929年，美国天体物理学家埃德温·P. 哈勃（Edwin P. Hubble）发现宇宙不是静止的。他发现并汇总了令人信服的证据：越遥远的星系，与银河系相对退行的速度就越快。换言之，宇宙正在膨胀。如此一来，尴尬于宇宙学常数没有已知的自然力与之相对应，以及错过了预测宇宙膨胀的机会，爱因斯坦完全抛弃了Λ，称这是他一生中“最大的错误”。他推测它的值为零，把它从公式中划掉了，就像下面这个例子：假设A = B + C。如果你后来得知A = 10且B = 10，那么只有当C等于0（C在公式中没有必要出现）时，A才仍然等于B加C。

但这并不是故事的结局。在过去的几十年里，时常有理论家将Λ从墓穴里起出来，想象他们的想法在具有宇宙学常数的宇宙中会是什么样子的。69年后，在1998年，科学最后一次请出了Λ。在那年年初，两组相互竞争的天体物理学家发表了一则引人注目的声明：一组由位于伯克利的劳伦斯·伯克利国家实验室的萨尔·波尔马特（Saul Perlmutter）领导，另一组由位于澳大利亚堪培拉的斯特蒙罗山天文台和赛丁泉天文台的布莱恩·施密特（Brian Schmidt）以及位于马里兰州巴尔的摩的约翰·霍普金斯大学的亚当·里斯（Adam Riess）领导。他们发现，与近处已经被详细研究过的超新星相比，他们观测到的数十颗最遥远的超新星比预期的要暗很多。要解释这种现象，要么是因为那些远处的超新星的行为表现与近处的这些不同，要么是因为它们比主流的宇宙学模型给出的距离要远15%。已知唯一能够“自然地”解释这种加速现象的就是爱因斯坦的Λ——宇宙学常数。当天体物理学家掸掉它身上的泥土并把它放回爱因斯坦广义相对论的原始方程时，宇宙的已知状态与爱因斯坦方程匹配上了。

****

佩尔穆特等人研究的这类超新星，其价值在于它爆发时的质量。由于这种超新星爆发时的质量都是一定的，又都以同样的方式爆发，在相同的时间里释放出同样多的能量，从而达到的最高亮度也是相同的，因此，它们能够作为一种标尺，或“标准烛光”，用于计算这些超新星所在星系的宇宙距离，以此类推，我们可以一直丈量到宇宙中最遥远的地方。

标准烛光极大地简化了计算：因为超新星都会释放出相同的能量，暗淡的距离远，明亮的距离近。在测量它们的亮度（一个简单的任务）之后，你可以准确地得出它们离你以及它们彼此有多远。

如果超新星的亮度各不相同，你就不能单独使用亮度来判断一个与另一个相比有多远了。这就像是一个暗淡的光点既可能是远处的高瓦数灯泡，也可能是近处的低瓦数灯泡。

不过还有第二种方法可以测量星系的距离：它们相对于我们的银河系的退行速度——退行是整个宇宙膨胀的一部分。正如哈勃首先证明的那样，膨胀的宇宙使得远处的天体比附近的物体运动更快。因此，通过测量星系的退行速度（另一项简单任务），可以推断出星系的距离。

如果这两种行之有效的方法对于同一个物体得出了不同的距离，一定是什么地方出了问题。要么是超新星不是一种好用的标准烛光，要么是我们通过测量星系速度而得到的宇宙膨胀率模型是错误的。

嗯，是出错了。事实证明，问题不出在超新星身上，超新星是完美的标准烛光，经受住了许多质疑者的仔细检验，所以天体物理学家必须面对一个比我们想象的膨胀得还要快的宇宙，使星系位于比此前根据星系退行速度测算出的更远的位置。除了引入Λ——爱因斯坦的宇宙学常数，没有更简便的方法能解释这种额外的膨胀。

这是宇宙中充斥着排斥力的第一个直接证据，它与引力相反，这就是如何以及为什么宇宙学常数能起死回生了。Λ突然获得了一个物理实相，于是它需要一个名字，所以“暗能量”登上了宇宙戏剧舞台的中央。

这个名字非常恰当地体现了它的神秘，又体现了我们对其成因的无知。波尔马特、施密特和里斯无可争议地因为这一发现而分享了2011年的诺贝尔物理学奖。

迄今为止最精确的测量结果显示，暗能量是宇宙中最主要的东西，目前占据了所有质量-能量的68%，暗物质占了27%，一般物质仅占5%。

****

我们四维宇宙的形状取决于宇宙中存在的物质、能量的总量和宇宙膨胀速度之间的关系。我们用来描述宇宙形状的数学参数，是又一个牢牢把握宇宙命运的大写希腊字母：Ω（omega）。如果你把观测的物质-能量密度除以恰好勉强使宇宙停止膨胀的物质-能量密度（称为“临界密度”），你就会得到Ω。

因为质量和能量都会导致时空弯曲，所以Ω便能告诉我们宇宙的形状。如果Ω小于1，实际的质量-能量会低于临界值，宇宙就会在所有的方向上永远膨胀，形成马鞍形，在这个宇宙里最初的平行线将会彼此发散远离。如果Ω等于1，宇宙将永远膨胀，但仅此而已。在这种情况下，宇宙形状是平坦的，我们在高中学习的平行线几何规则将一直有效。如果Ω大于1，平行线会发生汇聚，宇宙向其自身弯曲，最终将再次坍缩成为火球，正如它形成之时。

自从哈勃发现宇宙膨胀以来，还没有任何观测者测量到任何地方的Ω值接近1。把他们的望远镜能看到的所有质量和能量相加，甚至外推至这些限度之外，把暗物质也包含在内，得到的最大观测值是Ω＝0.3。对这些观测家而言，宇宙是马鞍形的，是开放的。

然而，从1979年开始，麻省理工学院的美国物理学家阿兰·H.　古斯（Alan　H.　Guth），还有其他一些科学家，对大爆炸理论进行了调整，清理了一些令人困扰的问题，使宇宙如我们所知的那样平坦地充满了物

质和能量。对大爆炸理论的这次更新的一个重要副产品是，它使Ω趋向于1。不是趋向1/2，也不是趋向于2，更不是趋向100万，而是趋向于1。

世界上几乎没有任何一个理论家对此持有异议，因为它使大爆炸理论能够解释已知宇宙的整体性质。然而，还有一个小问题：这次调整所预测的宇宙质量-能量的总和，足足是观测量的三倍。对此，理论家没有气馁，他们说观测家们只是找得还不够努力。

在统计结果的最后，可见物质仅占临界密度的不到5%。那神秘的暗物质呢？科学家们把它也加上了。当时没有人知道它是什么，我们现在仍然不知道它是什么，但它肯定对质能总量有贡献。我们曾经得出暗物质是可见物质的5或6倍。但那还是太少了。观测家们茫然困惑，理论家们回应道："继续找。"

两个阵营都确信对方是错误的——直到发现了暗能量。当把暗能量添加到普通物质、普通能量以及暗物质中去的时候，宇宙的质量-能量密度提高到了临界水平。这让观测家们和理论家们都感到很满意。

理论家和观测家终于握手言和了。他们各自做事的方式都是正确的。就像理论家对宇宙的要求一样，Ω确实等于1，尽管你把所有的物质（包括暗物质或其他物质）加在一起都达不到——他们曾天真地以为会有更多物质。今天，宇宙中不会存在比观测家们估计的更多物质了。

没有人曾预见到暗能量在我们的宇宙中占据着如此重要的地位，也没有人曾想见它会是科学分歧的伟大调解人。

****

那么，它是什么东西呢？没有人知道。人们给出最接近的解释是，假定暗能量是一种量子效应——真空的空间并不是空无一物的，实际上翻腾着粒子和它们的反物质。它们成双成对地出现又消失，存在时间太

短而无法被测量。它们瞬时存在的特性被写在了它们的名号中：虚粒子。由于每对虚拟粒子都曾经如此短暂地跻身于太空，它们会施加一点点向外的压力。

不幸的是，当你估计从虚粒子短暂的生命中产生的“真空压力”这种排斥力的大小时，它竟然比实验确定的宇宙学常数要大10120倍。这是一个大得有些愚蠢的数字，它导致了科学史上理论和观测之间最大的不匹配。

是的，我们对暗能量一无所知。但这种无知并非一无是处。暗能量不是漂浮不定的，有一个理论可以锚定它。暗能量栖息在我们可以想象的最安全的港湾之一：爱因斯坦的广义相对论方程。这就是宇宙学常数。这就是Λ。无论暗能量是什么，我们已经知道如何测量它，以及如何计算它对宇宙的过去、现在和未来的影响。

毫无疑问，爱因斯坦最大的错误是宣称那个Λ是他最大的错误。

****

对暗能量的搜寻开始了。既然我们知道暗能量是真实的，各路天体物理学家已经开始了雄心勃勃的计划，他们用地面和太空望远镜来测量宇宙中的距离，测量宇宙结构的增长。这些观测将检验暗能量对宇宙膨胀史的详细影响，并肯定会使理论家们忙个不停。他们迫切需要弥补他们计算暗能量理论值时造成的尴尬。

我们需要修正广义相对论吗？广义相对论和量子力学的联姻需要重大修改吗？还是有一些暗能量理论等待着某个尚未出生的聪明人去发现？

Λ和宇宙加速膨胀的一个显著特征是，斥力产生于真空之中，而不是来自任何物质。随着真空的增长，宇宙中物质和（我们熟悉的）能量密度逐渐减小，而Λ对宇宙状态的相对影响变得更大。随着更大的斥力

产生更多的真空，而更多的真空产生更大的斥力，迫使宇宙进入无休止的指数加速膨胀。

因此，任何没有被银河系束缚在附近的东西都将以越来越快的速度退行，成为时空结构加速膨胀的一部分。如今在夜空中可见的遥远的星系，最终将会消失在可以企及的视野之外，而它们离我们远去的速度比光速还要快。如此的宇宙壮举，并不是因为它们以这样的速度在太空中运动，而是因为宇宙的结构本身以这样的速度承载着它们。没有物理定律能阻止这一点。

再过大约一万亿年，居住在我们银河系里的所有人可能根本就不知道还有其他星系存在。我们的可观测宇宙将只包括一个由邻近的长寿恒星组成的系统。在这繁星满天的黑夜之外，还会有无尽的虚空——那是深空黑暗的脸庞。

暗能量是宇宙的基本属性，它最终将会削弱人类后代理解未来宇宙的能力。除非当代整个银河系的天体物理学家能将现在的宇宙做一个很好的记录，并埋下一个可以保存万亿年的时间胶囊，否则末日之后的科学家将会不知星系为何物——而星系是我们当前宇宙物质组成的主要形式——而且他们也将永远错过我们当前宇宙这部剧本的关键页面。

在我的梦中我不止一次想到：我们是否也错过了宇宙过去的一些基本章节？宇宙历史这部大书的哪一部分被标记了“拒绝访问”？我们的理论和方程式中，还缺少什么本应存在的东西，让我们苦苦追寻却可能永远找不到答案？

07　元素周期表里的宇宙

The Cosmos on the Table

有时候仅仅为了回答一些琐碎的问题，也需要深刻和广博的宇宙知识。在中学化学课上，我问我的老师元素周期表上的元素是从哪里来的。他回答说，从地壳里来的。我承认他说的没错。这肯定是实验室得到那些材料的地方。然而，地壳里的元素是从哪儿来的呢？答案一定和天文学有关。但要回答这个问题，真的需要知道宇宙的起源和演化吗？

是的，肯定需要。

只有三种元素是在宇宙大爆炸时自然出现的。其余的都是从高温的恒星核心，以及垂死恒星爆炸后的余烬中锻造出来的，这让后代的恒星系统得以吸纳这些重元素，从而形成行星，继而诞生人类。

对许多人来说，元素周期表只是一个被遗忘的怪东西——在中学课本上，一张满是格子的大图，上面写满了神秘咒语一般的字符。作为宇宙中所有已知和未知元素的化学行为的组织原则，这张图表应该被视为人类文化的一个标志，它是全人类科学探索的见证——这些探索包括发生在实验室里的、粒子加速器里的，以及宇宙研究前沿领域里的。

然而，时不时地，即使是科学家也禁不住把元素周期表看成是苏斯博士[9]笔下的奇禽异兽动物园。否则，我们怎么能相信有毒、高金属活性并且软到可以用黄油刀切开的钠，和一种臭臭的致命气体氯混合在一起，生成的氯化钠却成为了一种生物必需的，被称为食盐的无害化合物？氢和氧的结合也很神奇，一种是爆炸性气体，另一种则强烈助燃，然而两者结合则可生成液态水，而水可以灭火。

下面请允许我挑出一些对宇宙有重要意义的元素，从天体物理学家的角度来提供解读。

****

氢是最轻和最简单的元素，原子核内只有一个质子，它完全是大爆

炸时期产生的。在94种天然元素里，氢占据了人体内所有原子数目的三分之二还多，在宇宙的所有原子中更是超过了90%，包括太阳系在内的所有尺度上都是如此。在巨大的木星的核心里，氢处于如此大的压力下，致使它的行为更像一种导电的金属而不是气体，从而产生了太阳系行星中最强的磁场。1766年，英国化学家亨利·卡文迪许（Henry Cavendish）在实验时从水（H_2O）中发现了氢（hydrogen的英文名来自希腊文hydro-genes，意思是“生成水的”），不过卡文迪许在天体物理学领域最广为人知的是，他是第一个通过测量牛顿引力方程里引力常数的精确值，从而计算出地球质量的人。

每一天的每一秒，在太阳那个温度高达1500万开尔文的核心里，就有45亿吨高速移动的氢原子核撞击形成氦，转变成能量。

****

氦是一种低密度气体，当你吸入氦气时，会暂时提高你的气管和喉部的振动频率，使你的声音听起来像米老鼠。氦是宇宙中第二简单和第二丰富的元素。虽然丰度（原子数比例）比氢小得多，但它的含量是宇宙中除了氢之外所有其他元素总和的4倍以上。大爆炸宇宙学的支柱之一是，它预言在宇宙的任何区域，氦元素在所有原子中所占的比例不少于10%，这一比例在宇宙诞生时的原始火球中便混合形成了。因为在恒星内的氢核聚变也会产生氦，所以宇宙中的某些区域可以很容易积累超过10%的氦，但是正如大爆炸理论预言的，迄今为止还没有人发现过某个星系里的氦含量少于这一比例。

在氦元素在地球上被发现并分离出来的30年之前，1868年日全食期间，天文学家们在太阳的日冕光谱中探测到了氦。正是这个原因，氦（helium）才得名于希腊太阳神赫利俄斯（Helios）。氦的浮力是氢的92%，但没有氢的易爆性，所以节日庆典活动上用的大型充气人偶就是用氦作为填充气体的，于是举办这种活动的商场等单位，成了仅次于军队的第二大氦元素用户。

****

锂是宇宙中第三简单的元素，它的原子核中有三个质子。就像氢和氦一样，锂也是在大爆炸中制造出来的，但与氦也可以在恒星核中制造不同的是，锂会被每一个已知的核反应所破坏。大爆炸宇宙学的另一个预测是，我们可以预期宇宙任何区域中，锂的原子数比例不超过1%。还没有人在任何星系中，发现锂的含量超过这一比例。氦的丰度下限和锂的丰度上限互相对照，为检验大爆炸宇宙学提供了强有力的双重约束。

****

碳元素能够合成很多种分子，其种类要比其他所有不含碳的分子的总和还要多。宇宙中有大量的碳，它们在恒星核心里被锻造，又被翻搅到恒星表面，并大量释放到星系空间里，所以碳是最适合成为化学和生物多样性基础的元素了。氧元素在丰度排名中略胜于碳，也很常见，它是从爆炸恒星的残骸中被锻造和释放出来的。氧和碳都是我们所知道的生命的主要成分。

但我们不知道的生命形式呢？基于硅元素的生命会是什么样的？硅在元素周期表中位于碳的正下方，这意味着，从原则上来说，它可以创造出与碳同样多的分子组合。不过，最后还是碳胜出了，因为在宇宙中，碳比硅要丰富十倍。但这并不能阻止科幻小说作家们的想象力，他们总是在警惕着外星生命，却也最想知道第一个硅基的外星人会是什么样子。

钠，除了作为食盐的活性成分以外，也是目前城市路灯中最常见的发光气体。钠光灯要比白炽灯“燃烧”得更亮，寿命也更长，但是这两种灯泡可能很快都会被LED灯所取代，因为LED灯在特定功率下更亮，也

更便宜。最常见的钠光灯有两种：黄白色的高压钠灯，和比较少见的发橙色光的低压钠灯。尽管所有的光污染对天体物理学都是有害的，但低压钠灯是最不坏的，因为它们的污染可以很容易地从望远镜数据中去掉。作为合作范例，离凯特峰国家天文台最近的大城市——亚利桑那州图森市，已经通过了与当地天体物理学家的协议，将城市所有路灯换成低压钠灯。

****

铝占据了地壳的近10%，但对古人来说却是未知的，我们的曾祖父母对它也不熟悉。因为这种元素直到1827年才被识别和分离出来，直到20世纪60年代末才进入普通家庭，当时锡罐和锡箔被铝罐、铝箔所取代（我敢打赌，你认识的大多数老年人仍然把这种材料叫锡纸）。抛光后的铝可制成几近完美的可见光反射镜，是今天几乎所有望远镜的首选涂层。

钛的密度是铝的1.7倍，但强度是铝的两倍以上。因此，钛——在地壳中第九丰富的元素——已经成为许多现代用品的宠儿，如军用飞机部件和假肢都需要一种轻便而高强度的金属来实现其功能。

在宇宙中的大多数地方，氧原子的数量都超过了碳。在每一个碳原子都锁住了可用的氧原子（形成一氧化碳或二氧化碳）之后，剩余的氧便与其他元素结合，比如钛。红色恒星的光谱中布满了源于钛氧化物的特征，钛氧化物本身对地球上的“明星”来说并不陌生：星光蓝宝石和红宝石呈现的星彩就是由晶格中的钛氧化物杂质造成的。此外，用于望远镜圆顶的白色涂料含有钛氧化物，它恰好在光谱的红外线部分具有高度反射性，能大大减少望远镜周围空气中积累的阳光热量。黄昏时分，随着圆顶的打开，靠近望远镜的空气温度迅速与夜间空气的温度达到一致，使得恒星和其他宇宙天体的光线变得锐利而清晰。而且，钛（titanium）的名字虽然不是直接来自宇宙天体，但它来自希腊神话的泰坦巨人（Titans），泰坦也是土星最大卫星土卫六的名字。

****

从很多方面来说，铁都算得上宇宙中最重要的元素。大质量恒星在其核心中制造的元素，依次从氦到碳到氧到氮，等等，在元素周期表上一直延续到铁。在铁原子核中，有26个质子和至少同样多的中子。铁的特殊之处在于，在所有元素中，它的每个核粒子具有的总能量最小。这意味着一些很明显的事情：如果你通过裂变来分裂铁原子，它们就会吸收能量。如果你通过聚变来合成铁原子，它们也会吸收能量。别忘了恒星就是在忙着制造能量。随着大质量恒星在其核心制造和积累铁元素，它们也正接近死亡。如果没有丰富的能量来源，这颗恒星就会在自己的重量下坍缩，紧接着发生反弹，形成猛烈的超新星爆发，在超过一个星期的时间里，它会比10亿个太阳还亮。

****

软金属镓的熔点如此之低，像可可脂，接触到你的手就会熔化。除了用来进行空手熔金这种客厅炫技之外，天体物理学家对镓并不感兴趣，除非是作为镓化氯实验的一种成分，用来探测来自太阳的令人难以捉摸的中微子。在这个实验里，大量（100吨）的液态氯化镓被深埋在地下的一个大桶里，用来监测中微子和镓原子核之间发生的碰撞，这个反应将镓转化为锗。在每次原子核被撞击时，这种相遇都会发出X射线。久而未决的太阳中微子问题，即探测到的中微子比理论预测的要少的问题，就用这样的“望远镜”解决了。

****

锝的所有同位素都有放射性。除了在粒子加速器里可以按需制造，在地球的任何地方都找不到它。锝的这种特征写在了它的名字里，Technetium来自希腊文technetos，意思是“人造的”。出于尚未完全理解的原因，锝存在于一小类红色恒星的大气层中。单就这一点来说并没什么，不过值得注意的是，锝的半衰期仅为200万年，比这些恒星的生命期要短很多很多。也就是说，锝并不是这些恒星一开始就具有的元素，否则它们早就衰变殆尽了。在恒星核心也没有已知的机制产生锝，并让它翻腾到恒星表面从而被我们发现。对这一现象的解释已经导致了多种奇怪的理论，在天体物理学界尚未达成共识。

****

与锇和铂一起，铱是元素周期表里三种最重（密度最大）的元素之一——体积相当于三个桶装水（56升）的铱的重量就比一辆别克车还重。铱也是下面著名事件的铁证：在世界各地的白垩纪、古近纪地层交界处，都发现了可追溯到6500万年前的铱元素。并非巧合的是，当时凡是比登机箱大的陆地物种都灭绝了，包括传奇一般的恐龙。

铱在地球表面很罕见，但在直径10千米的金属小行星上相对常见，当小行星撞上地球时，因撞击而气化，把它带来的铱洒遍了地球表面。所以，无论你最喜欢哪一种恐龙灭绝理论，来自外太空的一颗珠峰大小的杀手小行星都应该名列榜首。

****

我不知道阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）会怎么想，但在

1952年11月1日的南太平洋埃尼威托克环礁第一次氢弹试验的残骸中，发现了一种未知的元素，为了向他致敬而命名为锿（einsteinium）。要是我能给它命名，我会给它起名叫“末日元素”（armageddium[10]）。

同时，在元素周期表中有十个元素的名字是来自围绕太阳运行的天体：

磷（Phosphorus）的名字来自希腊文，意思是“带来光明者”（light-bearing），也是金星的古代名称，因为它是启明星，在黎明日出之前出现在天空。

硒（selenium）的英文名来自希腊文的“月亮”（selene），它之所以得此名是因为，在采矿中它总是与元素碲相伴存在，而碲（tellurium）的名字的来自拉丁文“地球”（tellus）。

1801年1月1日，意大利天文学家朱塞普·皮亚齐（Giuseppe Piazzi）在火星与木星之间的巨大空旷地带，发现了绕太阳运行的一颗新行星。根据用罗马神命名行星的传统，这个天体以丰收女神之名被命名为谷神星（Ceres）。当然，Ceres也是“谷类食物”（cereal）这个词的词根。谷神星的发现让科学界非常兴奋，为向其致敬，便把之后发现的一种新元素命名为铈（cerium）。两年后，在谷神星绕着太阳运行的同一空间又发现了一颗行星，它被称为智神星（Pallas），来源于罗马神话里的智慧女神帕拉斯，并且，因循铈的例子，发现智神星之后找到的第一个元素被命名为钯（palladium）。这种命名传统在几十年后结束了，因为人们在同一轨道区域发现了更多类似的天体，并且发现它们比已知最小的行星还要小得多。其实被发现的这片区域是太阳系的一片新领地，其中布满了小而不规则的石块和金属块。谷神星和智神星不是行星；它们是小行星，它们所在的小行星带中，现在已发现了数十万个天体——这可比元素周期表中的元素多太多了。

金属汞（mercury），在室温下呈液态，滚来滚去，它跟太阳系所有行星中运动最快的水星（Mercury），都是以罗马神话里行动迅速的信使之神墨丘利命名的。

钍（thorium）是以北欧神话中的强壮的、挥舞着闪电的雷神托尔

（Thor）命名，它对应罗马神话里以闪电为武器的朱庇特（Jupiter，这也是木星的英文名）。说到木星，哈勃望远镜对木星两极区域的观测图像显示，在那里湍急的云层深处确实存在大规模的放电活动。

唉，土星，萨图恩（Saturn），我最喜欢的行星[11]，并没有以它命名的元素，但天王星（Uranus）、海王星（Neptune）和冥王星（Pluto）都有很著名的代表元素。

元素铀（uranium）在1789年被发现，其命名是为了向八年前威廉·赫歇尔（William Herschel）发现的天王星致敬。铀的所有同位素是不稳定的，会自发地衰变成较轻的元素，这个过程伴随着能量释放。在战争中使用的第一颗原子弹，即以铀作为其活性成分，于1945年8月6日被美国投到了日本广岛。在铀核中有92个质子，被普遍认为是自然形成的“最大”元素，不过在铀矿里还是可以发现较大的自然元素，但含量极少。

如果天王星值得向其致敬而命名一种元素，那么海王星也是如此。然而情况不太一样的是，铀是在天王星发现不久之后找到的，镎（neptunium）则是1940年在伯克利回旋加速器里发现的，距离德国天文学家约翰·加勒（John Galle）发现海王星已经过去整整97年了。法国数学家约瑟夫·勒维耶发现天王星的轨道行为很怪异，他预言存在一颗未知行星干扰了天王星的运动，并计算出这颗行星的轨道，加勒正是在预言的那片天区找到了海王星。就像在太阳系中海王星跟在天王星之后一样，在元素周期表中镎也会紧跟在铀之后出现。

伯克利回旋加速器发现（或说是制造了）许多自然界中找不到的元素，包括钚（plutonium），在元素周期表里，它紧跟在镎之后，以冥王星（Pluto）命名；冥王星是1930年克莱德·汤博（Clyde Tombaugh）在亚利桑那州的洛厄尔天文台发现的。就像129年前发现谷神星一样，人们兴奋不已。冥王星是由美国人发现的第一颗行星，而且在没有更好的数据的情况下，它被普遍认为是大小与地球相当的天体。然而，由于测量手段变得越来越精确，测到的冥王星尺寸也在不断变小。

我们对冥王星大小的了解直到20世纪80年代末才稳定下来。现在我们知道，冰冷的冥王星在曾经的九大行星里个头小得不成比例，甚至比

太阳系的六颗最大的卫星还要小一点儿。和成群结队的小行星一样，后来人们发现，太阳系外围存在着数以百计与冥王星相似的天体。这预示着冥王星跻身大行星的日子已经不多了，并且由此也揭示了此前未曾被记录的柯伊伯彗星带的存在，冥王星就属于这个小型冰天体群。考虑到这一点，有人可能会认为，谷神星、智神星和冥王星是以其假象溜进了元素周期表。

不稳定的武器级钚，是在广岛被炸毁三天后，美国在日本长崎上空引爆的那枚原子弹的活性成分，这使第二次世界大战迅速结束。前往太阳系外的航天器装有“放射性同位素热电发生器”，通常都以少量非武器级的放射性钚为能源，因为那里阳光的强度已经下降到不能使用太阳能电池板了。1磅（约0.45千克）钚能产生1000万千瓦时的热能，这足以给一盏白炽灯供电11000年，要是我们人类能依靠核燃料提供的能量代替食物，这些能量也够一个人用11000年。

****

所以，在元素周期表的宇宙之旅结束时，我们已经到达了太阳系的边缘，甚至更远。至今我还不能理解，为什么那么多人不喜欢化学制品，还有人要求食物中禁用化学物质。也许那些又长又难懂的化学名称听起来很可怕，但这应该怪罪化学家，而不是化学物质本身。就我个人而言，我对无论存在于宇宙何处的化学物质都没有什么不适。我最喜欢的恒星，以及我最好的朋友们，都是由化学物质构成的。

08　关于球形这回事儿

On Being Round

除了晶体和破碎的岩石，宇宙中很少有东西天然就带着棱角。虽然许多物体形状奇特，但从简单的肥皂泡到整个可观测的宇宙，球形物体的名单实际上是无穷无尽的。在所有形状中，球形最受简单物理定律的青睐。物体呈球形的倾向如此普遍，以至于我们为了取得对物体的基本了解，常常假设它是球形的，即使我们确定它是非球形的。简而言之，如果你不了解球形，那么你就不能宣称理解了物体的基本物理性质。

自然界中的球形是由诸如表面张力之类的力制造的，它们希望使物体在各个方向都变得更小。液体的表面张力使肥皂气泡在各个方向挤压空气，它会在被形成的瞬间，用尽可能少的表面积来包围那部分空气。这就产生了具有最高强度可能的气泡，因为除非必要，肥皂膜就不需要扩张得更薄。只要用大学一年级的微积分，你就可以证明这种，也是唯一的一种，对封闭的体积来说具有最小的表面积的形状，是一个完美的球体。事实上，如果所有的装运箱和超市里的所有食品包装都是球形的，那么每年可以节省数十亿美元的包装材料费用。例如，一盒超大份的麦片，可以很容易地装入一个半径为12厘米的球形纸箱。但实用性更占上风——没有人想要在球形包装盒滚下货架后去满地追赶它们。

在地球上，制造滚珠轴承的一种方法是用车床加工，另外一种是将事先定好量的熔融金属液滴在长传动轴的顶端。在固定成为球形之前，金属液滴会不停地颠簸，而且需要足够的时间来硬化，然后才算完工。在地球轨道上的空间站里，那里一切都是失重的，你轻轻地喷出精确定量的熔融金属，之后你就不用管了——珠子冷却过程中就会悬浮在那里，直到它们硬化为完美的球体，表面张力会为你做所有的工作。

****

对于庞大的宇宙天体来说，是能量和引力共谋将其转化为球体。引力是使物质在各个方向坍缩的力量，但引力并不总是会赢——固态物体的化学键很强大。由于地壳岩石的支撑，喜马拉雅山的生长克服了地球

引力的作用。但在你对地球上的巍峨大山兴奋莫名之前，你应该知道，从最深海沟到最高山脉之间的高度大约只有20千米，但是地球的直径将近13000千米。因此，与在它表面上走动的微小人类的认识相反，地球作为一个宇宙天体，是非常平滑的。如果你有一个宇宙超级无敌大手，用它拂过有高山深海的地球表面时，会感到像台球一样光滑。那些昂贵的地球仪上高耸的山脉，其实是严重夸大了实际情况。这就是为什么尽管地球有山脉和山谷，以及在两极方向上略扁，但从太空看起来，地球与完美球体并无二致。

与太阳系其他星球上的山相比，地球的山其实微不足道。火星的最高山奥林匹斯山的高度约2万米，山底部近500千米宽。这让阿拉斯加的麦金利峰看起来像个鼹鼠丘。宇宙造山的方法很简单：天体表面的引力越弱，其山脉就能更高。珠穆朗玛峰的高度差不多已经达到了地球山峰的极限了，因为如果再高，它下方的岩层就会被自身的重量压垮。

如果固体天体的表面引力足够低，其岩石中的化学键就能够抵抗自身重量的作用。在这种情况下，天体可能是任何形状的。两个著名的非球形天体是火卫一和火卫二，火星的这两颗卫星长得就像大土豆。两个卫星中火卫一略大，尺寸为27千米×22千米×18千米，一个重70千克的人在它上面仅相当于地球上的110克。

在太空中，表面张力总是迫使一小团液体形成球体。每当你看到一个小的固体物体是球形的，你大可以假设它形成时曾处于熔融状态。如果那团东西质量非常大，那么不管它由什么组成，引力都将确保把它塑造成一个球体。

星系中体积庞大、质量巨大的气团可以凝聚成近乎完美的气态球体，这就是恒星。但是，如果一颗恒星轨道离另一个引力很大的天体太近，那么随着它的物质被夺走，它的球体形状也会被扭曲。所谓“太近”，我的意思是太接近另一个天体的“洛希瓣”——以19世纪中叶的数学家爱德华·洛希（Édouard Roche）命名，他对双星附近的引力场做了详细的研究。理论上，洛希瓣是两个相互围绕的天体周围像哑铃状的一对包层。

如果一个常见的天体的气体物质从它自己的包层中跑出来，就会掉

向另一个天体。在双星系统中，当其中一个恒星膨胀为红巨星，物质溢出它的洛希瓣时，就会发生这种现象。此时，红巨星扭曲成一个奇特的非球形状，类似于一颗被拉长的好时巧克力。此外，有时双星中有一个是黑洞，它的位置就会因为正在被它吞噬的伴星而暴露出来。盘旋而出的气体，通过巨星的洛希瓣之后，被加热至极高温度，在掉落到黑洞本体消失之前会发出很亮的光。

****

银河系里的群星呈现出一个大大的、扁平的圆盘形状，它的直径与厚度之比为1000：1，比任何最平坦的煎饼还要平坦。对，银河系不是球形的，但最初却可能是。我们可以通过假设银河星是由一个巨大的、球形的、缓慢旋转的气体球坍缩而成，以便来理解它如今的平坦程度。在坍缩的过程中，这个球旋转得越来越快，这就跟花样滑冰运动员收紧双臂以增加自转速度是一样的。星系的两极方向自然地变扁，而中间增加的离心力阻止盘面的坍缩。

在银河系星云坍缩之前就已形成的任何恒星，它们保持在巨大并向下运动的轨道上。剩下的气体，很容易就粘到它们身上，就像两个热棉花糖在空中相撞，然后它们就被限制在了中间盘面上，后世的恒星，包括太阳在内，就在这里面生成。目前的银河系，既不在坍缩也不在膨胀，而是一个引力成熟的系统，在这个星系中，那些仍在盘面上方或下方轨道上运行的恒星，可以认为是最初球状气体云的残骸。

旋转物体总体趋于扁平是地球的极直径（从南极到北极）比赤道直径略小的原因。但差别并不大：千分之三，约42千米。但地球很小，主要是固体，而且旋转速度也不快。以24小时转一圈来算，地球赤道上的东西，仅仅以每小时1600千米的速度转动。相较之下，快速旋转的气态巨行星土星，它上面一天只有10个半小时，赤道上的线速度为每小时35000万千米，它的极直径比中间的赤道直径要短整整10%，这个差异甚至通过一个小型的业余望远镜就能看出来。变扁的球体一般称为扁椭

球体，而两极被拉长的球体称为长球体。在日常生活中，汉堡包和热狗分别是这两种形状很棒的例子（虽然有些极端）。我不知道你怎么想，我每次吃汉堡包，脑海里都会冒出土星的样子。

****

我们利用离心力对物质的影响，来获得极端宇宙天体的自转速度，比如脉冲星。由于它们的旋转速度高达每秒1000转，我们就可以知道，它们不可能是由日常物质组成的，否则它们本身就会由于旋转过快而解体。事实上，如果脉冲星旋转得更快一些，比如说每秒4500转，它赤道上的速度就达到了光速，这就告诉你这种材料极不寻常。

为了理解脉冲星，你可以想象一下，把整个太阳的质量装进一个曼哈顿大小的球里。如果这样很难做到，那么也许想象把1亿头大象装进一支唇膏管子里更容易一点。为了达到这个密度，你必须压缩所有虚空的空间，而这些空间原本是原子的原子核和它们的轨道电子自由运动之处。压缩之后，会将几乎所有的（带负电荷的）电子压进（带正电荷的）质子，形成一个（电中性的）中子球，表面引力高得令人发狂。在这样的条件下，登山者在地球上爬上500千米的悬崖所花费的能量，到了中子星上都爬不上一座相当于一张纸厚度的“山”！简而言之，在引力极大的地方，高处往往会倒塌，填补低洼之处——这听起来几乎像是《圣经》中“在为主预备道路”的形容：“一切山洼都要填满，大小山岗都要削平，高高低低的要改为平坦，崎崎岖岖的必成为平原。”（《以赛亚书》40：4）。如果有制造球体的秘诀，这就是了。基于所有这些原因，我们认为脉冲星是宇宙中形状最完美的球体。

****

富星系团的整体形状透露了深刻的天体物理学信息。有些富星系团形状破破烂烂，有些被拉成细丝，而另一些则形成巨大的片状。这些都没有形成稳定的球状。有些星系团尺度是如此巨大，宇宙140亿年的年龄都不足以使其成员星系完成对星系团的一次跨越。我们得出的结论是，这些星系团的样子生来就如此，因为其中星系之间的引力碰撞时间太短，还不足以影响星系团的形状。

但是其他系统，比如我们在关于暗物质的章节中遇到的那个美丽的后发星系团，从外观就可以立刻看出，引力已经把它塑造成球形了。因此，这种星系团的成员星系运动方向不太可能都是一样的。如果是一样的话，那么整个星系团也不能旋转得很快，否则，它就会像我们的银河系一样，变得扁平化。

后发星系团，跟我们的银河系一样，也是引力成熟的。在天体物理学中，这种系统被认为是“弛豫”的，也就是它已经处于一种平衡状态。这意味着许多事情，比如成员星系的平均速度是星系团总质量的良好指标，不管总质量是不是造成其平均速度的原因。正是这些原因，引力弛豫系统是探测不发光的“暗”物质的绝佳利器。请允许我做一个更强有力的声明：如果不是因为存在弛豫系统，无处不在的暗物质可能至今尚未被发现。

****

囊括所有球体的那个球体——其中最大的也是最完美的——是整个可观测宇宙。从每个方向上看去，所有星系都在离我们远去，其速度跟它们和我们的距离成正比。正如我们在前几章中所看到的，这是1929年埃德温·哈勃发现的膨胀宇宙的最大特征。

当把爱因斯坦的相对论和光速、膨胀宇宙，以及由于膨胀所致的质量和能量稀释结合在一起时，我们在每个方向上都能找到一个距离，在那里星系的退行速度等于光速。在这个距离上和更远处，所有发光物体

的光在到达我们之前就失去了所有的能量。也就是说，这个球形“边缘”之外的宇宙是不可见的，也不为我们所知。

在众多“多重宇宙”的版本中，有一个曾经广为流传，它认为多重宇宙并非由完全独立的宇宙组成，而是在一个连续时空结构之内，由彼此孤立、相互无接触的口袋空间组成。这就像大海上的许多艘船，它们彼此距离足够远，因此它们的圆形地平线并不相交。就其中任何一艘船而言（如果没有进一步的数据），它都是大海上唯一的船只，尽管它们共享着同一个海洋。

****

球体确实是多产的理论工具，能帮助我们洞察各种天体物理问题。但我们也不应该成为球形狂。我想起了一个关于“如何增加农场牛奶产量”的半认真的笑话：畜牧业专家会说：“改进奶牛的饲料……”工程师可能会说：“改进一下挤奶机的设计……”但轮到天体物理学家时，他说：“把奶牛改进成球形的怎么样……”

09　不可见光

Invisible Light

那么你还是用见怪不怪的态度对待它吧。

霍拉旭，天地之间有许多事情，

是你们的哲学所没有梦想到的呢。

——

《哈姆雷特》第1幕第5场

在1800年之前，在英文里，“光”（light）这个词除了用作动词和形容词外，指的只是“可见光”这个概念。但在那一年初，英国天文学家威廉·赫歇尔观察到了某种致暖效应，他认为这是由人眼看不见的光引起的。当时，赫歇尔已经是一个卓有成就的观测家，他在1781年发现了天王星，当时正在探索阳光、颜色和热之间的关系。他开始在一束阳光的路径上放置了一个棱镜——这并不新鲜，早在17世纪艾萨克·牛顿爵士就这样做了，并且命名了广为人知的七种可见光谱颜色：红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫。但赫歇尔的好奇心并未得到满足，他想知道每种颜色的温度可能是什么。所以他把温度计放在棱镜彩虹的不同区域，正如他猜想的那样，不同的颜色处确实记录下了不同的温度[12]。

设计完善的实验需要一个“对照组”，在对照组中你根本不指望有任何效果，它是作为实验的“傻瓜检验”而存在的。例如，如果你想知道啤酒对郁金香有什么影响，那么也可以同时拿另外一棵一样的郁金香，但给它浇的不是啤酒而是水。如果两种植物都死了——如果你把它们都杀死了——那么你就不能责怪啤酒。这就是对照组的价值所在。赫歇尔深知对照组的重要性，因此他在可见光谱之外，紧挨红光的那里也放了一个温度计，他预期在整个实验过程中这个温度计的温度不会超过室温。然而，意料之外的事儿发生了，对照组温度计的温度上升得比红色光那里还要高。

赫歇尔写道：

“（我）得出结论，整个红色区域仍然没有落在最大热量处，最大热量甚至可能是位于可见光之外。在这种情况下，辐射热至少有一部分，如果不是主要的话，包括——如果我可以被允许如此表达——不可见的光；也就是说，来自太阳的光线之中，有一种能量与我们的视觉并不对应。”[13]

天哪！

赫歇尔无意中发现了红“外”光（红外线），这是光谱紧挨红色“之外”的全新部分，他在关于这一主题的四篇论文中的第一篇报告了这一发现。

赫歇尔发现的秘密在天文学里的地位，相当于荷兰科学家安东尼·范·列文虎克（Antonie van Leeuwenhoek）发现的一滴湖水里有“许多非常小的活物，动得飞快”[14]。列文虎克发现了单细胞生物——一个生物学的宇宙；赫歇尔发现了一个新的光带。这两者都隐藏在众目睽睽之下。

其他研究人员马上接续了赫歇尔未涉足的范围。1801年，德国物理学家和药剂师约翰·威廉·里特（Johann Wilhelm Ritter）发现了另一个不可见光带。里特这次利用的不是温度计，他把一小堆光敏氯化银放置在每个可见光颜色区域，也放在了紧挨着紫色频谱结束的黑暗区域。果然，看似无光照区域中的那一小堆氯化银变黑的程度，要比紫色区域的还要深。紫色之外有什么？紫“外”光（紫外线）。

按照从低能、低频到高能、高频为序，来填满整个电磁波谱，我们就有了：无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽马射线。现代文明巧妙地利用了其中每一个频段，制造了无数的家庭和工业设施，让我们熟悉了它们。

****

在发现红外线和紫外线之后，天文观测没有在一夜之间改变。直到130年后，第一台用于探测不可见光波段电磁波的望远镜才建成。这时，无线电波、X射线和伽马射线早已被发现，德国物理学家海因里希·赫兹（Heinrich Hertz）也已证明，不同种类的光唯一真正的区别其实就是它们的频率。事实上，正是赫兹认识到了这一点，我们才有了电磁波频谱这个东西。为了纪念他，所有物体的振动频率的单位，都叫作赫兹。

奇怪的是，从发现不可见光带，到想到建造不可见光望远镜这个过

程，天体物理学家显得有点迟钝。技术尚未完备肯定是重要原因，但人类的傲慢也要承担一部分责任：宇宙怎么可能向我们发出我们的神奇肉眼看不到的光？超过三个世纪——从伽利略时代，直到埃德温·哈勃时代，建造望远镜只意味着一件事：制造一种捕捉可见光的仪器，增强我们天赋的视力。

望远镜仅仅是增强我们贫乏感官的工具，使我们能够更好地了解遥远的宇宙。望远镜越大，它就能让我们看见越暗淡的天体；镜片磨制得越完美，产生的图像就越清晰；它的探测器越灵敏，观测就越高效。在任何情况下，望远镜传递给天体物理学家的每一点信息，都是承载于光束之上来到地球的。

然而，天上发生的事情，并不只局限在人类方便观测的可见光波段。相反，它们通常在多个波段同时发出不同数量的光。因此，如果望远镜和探测器不能感知整个光谱，天体物理学家们将会错过许多宇宙中令人兴奋的东西。

以爆炸的恒星——超新星为例。这是宇宙中常见的高能事件，会产生数量巨大的X射线，有时在爆炸的同时，还伴随着伽马射线爆发和紫外线闪光，当然也少不了可见光。在爆炸气体冷却，冲击波消散，可见光变暗之后很久，超新星的“残骸”持续在红外波段发光，同时发出射电脉冲，这是宇宙中最可靠的计时器——脉冲星就是由此而来。

大多数恒星爆炸发生在太遥远的星系，但是如果一颗恒星在银河系内爆发，它的垂死挣扎将会亮到让每个人都能看见，根本无须望远镜。最近我们星系中的两次超新星爆发，一次发生在1572年，一次发生在1604年，虽然这两次壮丽的天象被广为记载，但它们产生的不可见的X射线或伽马射线却没人看到。

天文观测设备，是根据其观测的光波波段来设计的，这就是为什么没有单一的望远镜和探测器能同时看到这类爆炸的所有特征。但解决这个问题的方法很简单：收集多个光波段中得到的所有观测结果（或许由你的同行观测所得），然后给不可见的光指定某种可见光的颜色，从而创建一幅多波段图像。这正是电视剧《星际迷航：下一代》中的角色乔迪所看到的景象。有了这种“视力”，你将什么都不会错过。

只有在你确定了你想观测的波段后，你才能考虑你的望远镜的镜面大小、建造所需的材料、它的形状和表面，以及你需要何种探测器。例如，X射线波长非常短，所以，如果你要收集它们，你的镜子就要超级光滑，以免表面的瑕疵扭曲它们。但是如果你要收集波长很长的无线电波，你的镜子用你徒手弯成的铁丝网就可以了，因为铁丝的不平整比无线电波的波长要小得多。当然，你也需要大量的细节（高分辨率），所以只要资金充足，你的镜子应该尽可能地大。最后，你的望远镜口径必须远远大于你要探测的光波波长，在这方面，最明显的例子无疑是射电望远镜。

****

射电望远镜，最早的不可见光望远镜，是天文台的一个令人惊异的亚种。美国工程师卡尔·G. 央斯基（Karl G. Jansky）在1929年和1930年间成功地建成第一座射电望远镜。它看起来有点像无人农场的移动洒水系统。它由一系列高大的长方形金属框架制成，用木制的侧撑和底盘固定，下面安上了四个用福特T型汽车备胎做成的轮子，可像旋转木马一样转起来。央斯基调节这个30米长的装置，让其观测波长大约15米的电磁波，对应的频率为20.5兆赫。[15]央斯基为贝尔电话实验室工作，他建造这台设备是为了研究地面无线电通信的可能污染。这非常类似于35年后贝尔实验室给彭齐亚斯和威尔逊的任务，在后两者的接收机中发现了微波噪声，正如我们在第3章中看到的，这促成了宇宙微波背景的发现。

央斯基用他那个简单拼凑而成的天线，花了好几年时间，仔细追踪和记录接收到的静电噪声，他发现，无线电波不仅来自当地的雷暴和其他已知的陆地来源，也来自我们银河系的中心。那片天空区域每23小时56分钟就会经过望远镜的视野一次：这正是地球在太空中自转的周期，也正是银河中心回到天空同一个角度和高度所需要的时间。卡尔·央斯基发表了他的观测结果，标题为《显然来自地外源的电子干扰》[16]。

这项观测标志着射电天文学的诞生——但央斯基本人并未意识到这一点。贝尔实验室调整了他的工作，使他没能在他本人开创性的发现上取得更多的成果。不过，几年之后，来自伊利诺伊州惠顿市的一个名叫格罗特·雷伯（Grote Reber）的美国人，在自家的后院建造了一个9米宽的碟形金属射电望远镜。在1938年，在非受雇于任何人的情况下，雷伯证实了央斯基的发现，并在接下来的五年里制作了数幅低分辨率的射电天空地图。

雷伯的望远镜虽然是史无前例的创新，但根据今天的标准，它又小又粗糙。现代射电望远镜已经完全不是那样了。不受后院的束缚，它们有时是名副其实的巨型怪物。MK1望远镜，坐落在英国曼彻斯特大学乔德雷尔·班克天文台，它是一面可操控的76米宽的实心钢制单碟面，从1957年开始工作，是地球上第一个真正的巨型射电望远镜。在MK1开始运行几个月后，苏联发射了人造卫星“斯普特尼克1号”，这个盘状天线突然变成了跟踪轨道上那个小硬块的不二之选——这使它成为了追踪行星际太空探测器的太空跟踪网的先行者。

世界上最大的射电望远镜在2016年完工，被称为500米口径球面射电望远镜（Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope），简称 FAST。它是由中国在贵州省建造的，面积比30个足球场还大。如果外星人给我们打电话，中国人会第一个知道。

****

干涉仪是另一种类型的射电望远镜，由相同的盘状天线阵列组成，分布在郊区的大片地区，用电子方式连接在一起工作。它能产生对辐射源天体的单一、连贯、超高分辨率的图像。早在快餐业发明“supersize me”这个口号之前，它已经是望远镜领域不成文的座右铭了，尤其射电干涉仪更是其中的庞然大物。其中之一，是在美国新墨西哥州索科罗附近的一个非常大的天线阵，官方名称就是甚大阵（Very Large Array，VLA），它由27架25米口径的碟状天线组成，分布在跨越35千米的沙漠

平原轨道上。这座天文台是如此惊人，仿佛来自天外，因此多次成为电影大片的背景画面，包括《2010太空漫游》（1984），《超时空接触》（1997）和《变形金刚》（2007）。此外还有甚长基线阵列（Very Long Baseline Array，VLBA），10架25米的碟形天线从夏威夷到维尔京群岛，横跨8000千米，使它达到了世界上所有射电望远镜中的最高分辨率。

在微波波段的观测，对干涉仪来说是较新的任务，我们已经有了阿塔卡玛大型毫米波阵列（Atacama Large Millimeter Array，ALMA），它拥有66架天线，位于遥远的智利北部安第斯山脉。ALMA可以在不到1毫米到几厘米的波长范围内调节，让天体物理学家们能够用高分辨率看到其他波段无法看见的宇宙动态，如正在坍缩的星云结构，它们将成为恒星诞生的育婴房。ALMA之所以坐落在地球上最干旱的所在——海拔4800米的高原，是为了避开潮湿的云层。水可能对微波炉加热食物来说是很好的，但对天体物理学家来说是有害的，因为来自银河系甚至更远处的原始微波信号，会被地球大气层中的水蒸气吸收。水和微波关系密切:　水是食物中最常见的成分，而微波炉工作时主要是在加热食物中的水分。这预示着，微波碰到水，会被水吸收。因此，如果你想得到尽可能清晰的天体图像，必须像ALMA那样，想办法把望远镜和宇宙之间的水汽量降到最低。

****

在电磁波谱的超短波长那一头，你会发现高频、高能的伽马射线，波长在皮米[17]量级。伽马射线是在1900年发现的，但一直到1961年美国宇航局的“探险者11号”卫星搭载了一架新的望远镜，才在太空里探测到了伽马射线。

任何经常看科幻电影的人都知道伽马射线对你有害。你可能会变成满身绿色的彪形大汉，或手腕上会喷出蜘蛛丝的怪咖。但伽马射线也很难被捕获，因为它们能穿透普通的透镜和反射镜。那么，如何去观察它

们呢？“探险者11号”上望远镜的核心放着一个叫作闪烁器的装置，它通过发射出带电粒子来响应入射的伽马射线。如果你测量那些粒子的能量，你就能判断是哪种高能光创造了它们。

两年后，1963年，苏联、英国和美国签署了《部分禁止核试验条约》，禁止在水下、大气层和太空进行核试验——在那些地方核辐射可能扩散和污染到试验国以外的地方。但这是冷战时期，那个时代没有人相信任何人说的任何事情。援引“信任但要查证”的军事法令，美国部署了一系列新的卫星，即“维拉卫星”，用来监控由苏联的核试验所致的伽马射线爆发。这些卫星确实发现了伽马射线的爆发，几乎每天都有，但完全怪不到苏联头上。这些射线来自宇宙深空——后来被证明是来自宇宙间断续的、遥远的、规模巨大的恒星爆炸，这标志着伽马射线天体物理学的诞生，也是我所在研究领域的一个新的分支。

在1994年，就像维拉卫星的发现那样，美国宇航局的康普顿伽马射线天文台发现了一些出人意料的事情：在地球表面附近有频繁的伽马射线闪光。它们被理智地称为“地面伽马射线闪光”。核浩劫？不，从你正在读这句话的事实可以明显看出世界安然无恙。并非所有的伽马射线都是致命的，也不是都源自宇宙。每天在雷雨云的顶部附近，就在普通的闪电发生前的一瞬间，至少有五十次这样的闪光发生，它们的成因仍然是个谜，但最好的解释是，在雷雨云中，自由电子加速到接近光的速度，然后撞击到大气原子的原子核，从而产生了伽马射线。

****

今天，在光谱中的每一个不可见波段都有望远镜在运作，其中一些位于地面，但大部分位于太空——在那里，望远镜的视野不受地球大气层的阻碍。我们现在观测宇宙使用的波长，跨越了从数十米的低频无线电波，到不超过千万亿分之一米的高频伽马射线的广大范围。如此丰富的光源让天体物理学的新发现永无止境：想知道星系中的恒星中潜藏着多少气体？射电望远镜最擅长这项工作。如果没有微波望远镜，就不可

能有关于宇宙背景的知识，也不可能真正理解大爆炸宇宙学。想偷看银河系星云深处的恒星育婴房吗？注意红外线望远镜正在做的事情。在普通黑洞和星系中心的超大质量黑洞附近的辐射是什么情况？紫外线和X射线望远镜做得最好。想看一颗40倍太阳质量的庞大恒星的高能爆炸吗？通过伽马射线望远镜能够目击好戏。

从赫歇尔的“不可见光”实验以来，我们已经有了长足进步，让我们能够探索宇宙的真面目，而不是它看起来的样子。赫歇尔如果有知，肯定会很自豪的。我们只有在看到了不可见之物以后，才获得了真实的宇宙图景：在我们的哲学中，我们现在所梦想的，是跨越空间、跨越时间的，一个丰富灿烂的天体和现象的集合。

10　在行星之间

Between the Planets

从远处看，我们的太阳系很空旷。如果你把它封闭在一个球体内——一个足够大，足以包含最远的行星海王星的轨道[18]，那么太阳、所有行星以及它们的卫星所占据的体积，只占这个球体的万亿分之一略多一点儿。但行星之间的太空并非空无一物，而是包含各种形式的大石块儿、小石块儿、冰球、尘埃、带电粒子流，还有远航的太空飞船。太空里还遍布着巨大的引力场和磁场。

行星际空间并非空无一物，地球在轨道上的运行速度是每秒30千米，每天能扫到数百吨的流星体——其中大部分还没有一粒沙子大。流星体冲进大气层时能量如此之高，以至于几乎全部刚一接触就气化了，随即在地球上层大气中燃烧殆尽。我们地球上的这些脆弱物种，有赖于这层大气保护罩才得以生存演化。更大的，像高尔夫球大小的流星体升温很快，但不均匀，并且经常粉碎成许多小碎片，然后气化。还有更大的流星，表面都被烧焦了，但整个地落到了地面。你会认为，到现在为止，经过绕太阳旅行46亿圈之后，地球将会“清空”轨道路径上所有可能的碎片。并没有。但和过去比起来，现在的情况已经好多了。在太阳和它的行星形成后的5亿年里，有太多的碎片像暴雨一样落在地球上，持续撞击产生的热量使地球大气层变得炽热，连我们的地壳都熔化了。

一块非常大的碎片导致了月球的形成。从阿波罗登月计划带回来的月球样本中，科学家们意外地发现月球上缺少铁和其他更重的元素，这表明月球很有可能是从地球上缺铁的地壳和地幔中飞出去的，是一颗游荡的火星大小的原行星与地球任性碰撞的后果。这次碰撞后飞到轨道上的碎片合并形成了我们那颗可爱的低密度卫星。除了这次特别大的事件外，地球在其幼年时期所经受的猛烈轰击，在太阳系的行星和其他大型天体中并不罕见。它们也分别遭受了相似的创伤，这从月亮和水星的表面可以清楚地看到，由于没有大气，从而不会发生侵蚀作用，它们身上保留了这一时期的大多数撞击坑。

不仅太阳系被其形成时期的残骸撞得伤痕累累，而且附近的行星际空间还包含着火星、月球和地球遭受高速撞击时，从其表面抛出的大大小小的岩石。对流星撞击的计算机模拟表明，撞击区附近的地表岩石能够被以足够大的速度向上抛起，从而逃脱母体的引力束缚。根据在地球

上发现火星陨石的概率，我们得出的结论是每年大约有1000吨的火星岩石掉落在地球上；也许有相同量级的陨石从月球到达地球。回想起来，我们其实不必特意去月球带回月球岩石，我们身边就有很多，不过在阿波罗计划期间我们还不知道这一点。

****

太阳系的大多数小行星主要分布在主小行星带上，这是火星和木星轨道之间一个大致平坦的区域。根据传统，发现者可以根据喜好来命名他们发现的小行星。虽然艺术画中会把小行星带描绘成太阳系盘面上遍布奇石的一片区域，但那里的小行星总质量不到月球的5%，而月球自身的质量仅比地球质量的1%大一点。听起来无关紧要。但是它们的轨道不断地受到扰动，因此形成了数以千计的危险小行星，其椭圆轨道与地球的轨道相交。一个简单的计算表明，它们中的大部分将在1亿年内撞击地球。那些大于1千米的小行星碰撞所产生的能量足以破坏地球生态系统，并将地球上的大部分陆地物种置于被灭绝的危险之中。

那就太糟糕了。

小行星不是唯一对地球上的生命构成威胁的天体。“柯伊伯带”是一个布满彗星的带状环形区域，它开始于海王星的轨道之外，宽度范围和太阳到海王星的距离相当，冥王星也被包括在内。荷兰出生的美国天文学家杰拉德·柯伊伯（Gerard Kuiper）提出了这样的观点：在寒冷的太空深处，在海王星的轨道之外，还有来自太阳系形成时的冰冻剩余物。如果它们没有坠落到一颗大行星上，这些彗星将会绕太阳运行数十亿年。跟小行星带一样，柯伊伯带的一些天体沿着椭圆轨道行进时，也会与其他行星轨道交叉。比如冥王星和它的伙伴们组成的冥族小天体，会穿过海王星的公转轨道。其他柯伊伯带物体会一直深入到内太阳系，任性地穿越行星轨道。这些天体中，最著名的是哈雷彗星。

比柯伊伯带更远处，一直延伸到距离最近恒星一半路程的位置，还

有一个球状的彗星库被称为“奥尔特云”，得名于首先推断其存在的荷兰天体物理学家简·奥尔特（Jan Oort）。这个区域是长周期彗星的来源，那些彗星的轨道周期远长于人类的寿命。与柯伊伯带彗星不同，奥尔特云彗星可能从任何角度和任何方向进入内太阳系。20世纪90年代的两个最亮的彗星——海尔-波普彗星和百武彗星，都来自奥尔特云，而且短时间内它们将不再回来。

****

如果我们的眼睛能看到磁场，那么木星看起来要比天上的满月大十倍。访问木星的航天器必须被设计成不受这种强大力量的影响。正如英国物理学家迈克尔·法拉第在19世纪所证明的那样，如果你让一根导线通过一个磁场，沿导线长度方向就会产生电压。正是这个原因，快速移动的金属太空探测器的内部将会产生电流。同时，这些电流自身又会产生磁场，它们与周围的磁场相互作用，从而阻碍太空探测器的运动。

我最后一次细数太阳系中各行星的卫星数量时，一共是56颗。然后有一天我早上醒来，得知在土星周围又发现了十几个。从此之后，我决定不再管这些数字了。我现在关心的是，这些卫星中，哪个是有趣的、值得研究的。从某些方面来看，太阳系的卫星比它们所环绕的行星要更为迷人。

****

地球的卫星是月亮，它的直径约为太阳直径的1/400，但它到地球的距离，也是它和太阳距离的1/400，从而使太阳和月亮在天空中看起来一样大——这个巧合在太阳系的行星-卫星组合中是独一无二的，也让我们得以拍到独特的日全食照片。地球也潮汐锁定了月球，使它绕轴自

转和绕地球公转具有同样的周期。只要发生这种情况，被锁定的卫星就只会永远以同一面朝向它的母星。

木星的卫星系统充满了怪胎。木卫一（Io），是最接近木星的卫星，它也被潮汐锁定，由于受到木星和其他卫星的挤压作用，这颗小球体产生了足够的热量，使其内部岩石都熔化了，因此木卫一是太阳系中火山最活跃的地方。木卫二，还有一个名字叫欧罗巴（Europa），它上面有大量的水，它的加热机制——跟木卫一一样——已经融化了表面之下的冰，于是在冰面之下存在着温暖的海洋。如果有第二好的地方去寻找生命，就是这里。（有一位艺术家曾经问我，来自欧罗巴的外星人是否应该被称为“欧洲人”。我想不到其他任何貌似合理的答案，只能点头称是。）

冥王星的最大的卫星，冥卫一（Charon，卡戎），和冥王星比起来，它个头很大，而且很靠近冥王星，于是冥王星和它彼此潮汐锁定了对方，它们的自转周期和公转周期是相同的。我们称之为“双潮汐锁定”，这个词儿听起来像是尚未发明的摔跤套路。

根据惯例，太阳系的行星基本以罗马神话里的诸神命名，卫星则以希腊神话里与之相关的诸神角色来命名。古典文学里的神灵有着复杂的社会生活，所以不缺人物角色来给那么多卫星命名。这条规则的唯一例外是天王星的卫星，它们以英国文学的各种角色来命名。除了那些用裸眼轻易可见的行星，英国天文学家威廉·赫歇尔爵士是第一个发现新行星的人，他是英王忠诚的臣民，所以他原本准备以英国国王的名字来命名天王星。如果威廉爵士成功了，行星名单将会如下：水星、金星、地球、火星、木星、土星和乔治。幸运的是，清醒的头脑占据了上风，若干年后还是采用了符合古典传统的名字：天王星（Uranus，宙斯的祖父），但是他以莎士比亚的戏剧和亚历山大·蒲柏的诗歌里的人物来命名卫星的最初建议成为延续至今的传统。在它的27颗卫星里，我们会发现天卫一爱丽儿（Ariel）、天卫六考狄利娅（Cordelia）、天卫十苾丝梦娜（Desdemona）、天卫十一朱丽叶（Juliet）、天卫七奥菲利亚（Ophelia）、天卫十二波西娅（Portia）、天卫十五波克（Puck）、天卫二安布瑞尔（Umbriel）和天卫五米兰达（Miranda）。

太阳从它的表面以超过每秒100万吨的速度散失物质，我们称之为“太阳风”，它主要的形式是高能带电粒子，速度高达每秒1600千米。这些高能粒子流在遇到行星磁场时会发生偏转。这些粒子螺旋向下进入行星的南北磁极地区，与气体分子激烈碰撞，从而使大气发光，形成丰富多彩的极光。哈勃太空望远镜已经在土星和木星两极附近发现了极光。在地球上，北极光和南极光时常提醒我们，拥有一个起到保护作用的大气层是多么好。

地球大气层从地面向上延伸数十千米。“低”地球轨道上的卫星通常在200到800千米高度飞行，绕地球一圈大约需要90分钟。虽然在这样的高度你无法呼吸，但这里仍然存在一些大气分子——足以缓慢地消耗卫星的在轨能量。为了对抗这种阻力，低轨卫星需要经常提升轨道高度，以免落回地球而在大气层中烧毁。另一种定义大气层边缘的方法是，看何处它的气体分子密度等于行星间的气体分子密度。根据这个定义，地球大气层的范围将绵延数千千米。

在更高的位置上，大约36000千米（地球到月球距离的1/10）处，运行的是通信卫星。在这个特殊的高度上，地球的大气层不仅无关紧要，而且卫星的速度足够低，它需要一整天的时间才能围绕地球完成一次公转。在与地球自转速度精确同步的轨道上，这些卫星似乎一直悬停着，这使它们成为从地球表面一处向另一处发送信号的理想中继站。

****

牛顿定律特别指出，随着你离行星越来越远，行星对你的引力也就变得越来越弱，但并不会降到零。木星以其强大的引力场拦住了许多彗星的去路，否则它们将会在内太阳系肆虐。木星充当了地球的引力盾牌，就像一个魁梧的大哥哥，让地球拥有了长期（数亿年）的相对和平和安宁。没有木星的保护，地球上的生物将很难进化成有趣的复杂生命，并且总是会生活在毁灭性撞击带来的灭绝危机之中。

我们发射到太空的几乎每一个探测器都利用了行星的引力场。例如探索土星的“卡西尼号”，它就是经过了金星的两次引力助推，地球的一次助推（返回飞越），木星的一次助推。像连续变向的弹子球，借助一个行星的引力到达另一个行星是很常见的操作手段，否则仅靠火箭提供的能量和速度，探测器将无法到达它们的目的地。

我现在对太阳系的一些行星际残片负责。2000年11月，由大卫·李维和卡罗琳·舒梅克发现的主带小行星1994KA，被命名为13123-泰森以向我致敬。虽然我喜欢这种荣誉，但其实也没有什么好自夸的，因为好多小行星有我们熟悉的名字，如乔迪、哈里特和托马斯，甚至还有的小行星叫梅林、詹姆斯·邦德和圣诞老人。

目前发现的小行星已经有数十万颗，可能很快就会多得起不出名了。但不管那一天是否到来，我都颇感欣慰的是，以我的名字命名的那一块宇宙碎片并不孤单，因为在行星之间，跟它在一起的还有一大串以真实和虚构人物命名的其他碎块。

我也很高兴，目前，我的小行星没有朝地球冲过来。

11　另一个地球

Exoplanet Earth

无论你喜欢快跑、游泳、步行，还是爬行，从地球上一个地方到另一个地方的过程中，你都可以欣赏到我们这个星球上无穷的景色。你可能会看到峡谷绝壁上一条粉红色的石灰岩，一只在玫瑰茎上吃着蚜虫的瓢虫，一只从沙子里探出头来的蛤蜊。你所要做的就是看。

然而，如果从一架正在爬升的飞机的舷窗向外看，这些表面细节都将迅速消失。看不到蚜虫，也看不到好奇的蛤蜊。到达大约1万米巡航高度，连辨认高速公路都变得不容易。

当你进入太空时，更多的细节又消失了。从轨道高度约400千米的国际空间站窗口看出去，在白天你可能会认出巴黎、伦敦、纽约和洛杉矶，不过这是因为你在地理课上学过它们的位置。到了晚上，它们向四处蔓延的城市灯光使其显得更加明显。在白天，与传言不同，你看不到吉萨的大金字塔，也看不到中国的长城，它们毫不醒目的很大一部分原因是它们都是用取自周围环境的土和石头建成。虽然长城有万里之长，但它只有6米宽——比公路都窄，在飞机上都快看不到公路了，在更高的空间站上自然看不到长城。

从国际空间站轨道上用裸眼可以看到以下场景：1991年第一次海湾战争结束时，从科威特的油田大火中升起的烟柱；2001年9月11日从纽约燃烧的世贸中心腾起的浓烟。你也会注意到水田和旱田之间的绿色-褐色界限。除了这些之外，再也没有什么人造景观能让你从数百千米的天上辨认出来了。不过，你可以看到许多自然风光，包括墨西哥湾的飓风、北大西洋的浮冰，以及任何地方发生的火山喷发。

在38万千米之外的月球上，你将看不到纽约、巴黎，以及地球上任何大城市的都市灯火。但从月球上看过来，你仍然可以看到大型天气锋面（weather front）在地球上移动。当火星离地球最近时，距离大约5600万千米，从火星上用业余天文望远镜可以看到地球上被冰雪覆盖的大型山脉和大陆边缘。如果前往48亿千米外的海王星——在宇宙尺度上来说就是下一条街，太阳的亮度便只有现在的千分之一，在天空中占据的面积也只有地球上看到的千分之一。地球本身呢？它是一颗并不比暗星更亮的小斑点，几乎消失在了太阳的光芒里。

1990年，“旅行者1号”在海王星轨道外拍摄的一张著名照片，证明了从宇宙深空看来，地球是多么平淡无奇——“暗淡蓝点”，这是美国天体物理学家卡尔·萨根给它的称呼。这已经很大方了。如果不是特地加上辅助说明，你甚至可能都不知道它在那儿。

假如某些具有高等智慧的外星人，用他们的超级视觉器官以及最先进的设备，从远方巡视天空，那会发生什么？他们可能发现地球的哪些特征？

首先是蓝色，这是地球最重要的特征。水覆盖着地球表面的2/3还多；仅太平洋就占据了地球的一半。任何能探测出地球颜色的外星人，肯定会推断出水的存在，它是宇宙中第三丰富的分子。

如果外星人的设备分辨率足够高，他们看到的就不仅仅是一个暗淡蓝点。他们也会看到蜿蜒的海岸线，强烈地暗示着水是液态的。聪明的外星人肯定知道，如果一个行星有液态水，那么那个行星的温度和大气压就会保持在一个很容易确定的范围内。

地球独特的极地冰盖，随着季节温度的变化而消长，这是在可见光波段不难分辨的特征。推测出地球的自转是24小时也很容易，因为同一块陆地会在非常规律的时间间隔里进入他们的视野。外星人也会看到大型天气系统来来去去；通过仔细研究，他们可以很容易把云层与地表的特征区分开来。

该检验一下实际情况了。最近的太阳系外行星——围绕着太阳以外的恒星旋转的行星——位于半人马座α恒星系统中，它距离我们大约4光年，是一颗三合星系统，主要在南半球可见。而人类目前已发现的大多数系外行星位于几十到数百光年之外。地球的亮度不到太阳的十亿分之一，而且离太阳很近，这使得任何人想用可见光望远镜直接看到地球都非常困难。这就像在好莱坞的一盏探照灯附近探测萤火虫的发光一样。因此，如果外星人已经发现了我们，他们很有可能不是用可见波长看到的，比如红外线。在红外波段，地球的亮度和太阳比起来差异要小一些。不过，外星人工程师也可能采取其他的搜寻策略。

也许他们在做一些我们的行星猎人经常采用的方法：监视恒星，看

它们是否定期地晃动。一颗恒星的周期性晃动暴露了它周围行星的存在。与大多数人的想法不一样，行星不是简单地绕其主星公转，而是和它的主星围绕着它们共同的质心一起转动，行星越大，恒星晃动的幅度就越大，当你分析恒星的光谱时就可以更容易地做出预测。而这颗行星可能太暗淡而无法直接看到。对于搜寻行星的外星人来说，不幸的是地球很小，所以太阳几乎不怎么晃动，这将进一步挑战外星工程师们的技术水平。

****

美国国家航空航天局（NASA）的开普勒望远镜设计，就是为了发现和太阳类似的恒星周围的类地行星，它运用了另一种探测方法，大大增加了系外行星的发现数量。开普勒搜索的是那些总亮度定期略有下降的恒星。在这种情况下，开普勒的视线方向上正好可以看到一颗恒星会变暗一点点，原因是它的一颗行星正好从主星前面经过。不过，用这种方法你看不到行星本身，甚至也看不到恒星表面的任何特征。开普勒只是跟踪了恒星总光度的变化，但已经找到了数以千计的系外行星，包括数以百计的多行星系统。从这些数据中，你还可以了解到系外行星的大小、它们的轨道周期，以及它们与其主星的轨道距离。你也可以对行星质量做出有根据的推测。

在银河系某些位置的恒星看来，地球总是会出现于其视线方向上，当地球从太阳跟前经过时，它会遮挡太阳表面的万分之一，从而使太阳总光度从正常值变暗万分之一。这样外星人就会发现地球的存在，但对地球表面发生的事情则一无所知。

用无线电波（射电波）和微波来侦测地球的存在或许是不错的办法。也许那些监听我们的外星人，有类似于中国贵州省的500米口径射电望远镜这样的设备。如果他们有，如果他们调谐到正确的频率，他们肯定会注意到地球——或者更确切地说，他们会注意到我们的现代文明是天空中最“明亮”的无线电波和微波来源之一。我们不仅有传统的广播

本身，而且还有电视、手机、微波炉、车库门钥匙、车门钥匙、商用雷达、军用雷达和通信卫星。地球在长波频段中闪耀——壮观的证据表明这里发生了一些不寻常的事情，因为小型岩石行星在自然状态下，几乎不会发出任何无线电波。

因此，如果那些外星监听者把他们自己的射电望远镜指向我们，他们可能会推断我们的行星拥有科技文明。但麻烦的是，他们也可能做出其他解释。也许他们无法区分地球的信号与太阳系中较大行星的信号，因为这些大行星都是无线电波的巨大来源，特别是木星。或许他们会认为我们是一个新型的、奇怪的、无线电密集的行星。或许他们无法区分地球的射电辐射与太阳的辐射，迫使他们断定太阳是一种新型的、奇特的、无线电密集的恒星。

我们地球上天体物理学家就被类似的事件难住过。1967年英国剑桥大学的安东尼·休伊什（Antony Hewish）和他的团队正在用射电望远镜巡视天空，寻找所有的强射电源时，发现了一个非常奇怪的东西：一个天体具有精确的脉冲，重复的时间间隔略大于一秒。休伊什的研究生贝尔（Jocelyn Bell）是第一个注意到这一点的人。

不久，贝尔的同事们证实，脉冲来自很远的深空。认为这个信号是人为技术发出的想法——也就是在太空里另一种文明发出的信号——是令人难以抗拒的。正如贝尔所说："我们没有证据证明这是一个完全自然的射电辐射源……当时我试图用一种新技术取得博士学位，可一些愚蠢的小绿人竟然选择了我的天线和我的频率来跟我们联系。"然而，几天后，她又发现了来自银河系其他地方的重复信号。贝尔和她的同事们意识到他们发现了一类新的宇宙天体——完全由中子组成的恒星，它旋转的同时发射出射电脉冲。安东尼·休伊什和贝尔明智地将它们命名为"脉冲星"。

事实证明，拦截射电波并不是探听宇宙秘密的唯一方法，还有宇宙化学。对行星大气的化学分析已经成为现代天体物理学的一个活跃领域。你可能猜到了，宇宙化学依赖于光谱学——通过光谱仪分析光。利用光谱学家们的工具和方法，宇宙化学家们可以推断出在一颗系外行星上是否存在生命，不管那种生命是否有感知能力、智慧或科学技术。

这个方法之所以有效，是因为每种元素、每种分子，不管它存在于宇宙的什么地方，都以唯一的方式吸收、发出、反射和散射光。正如前面已经讨论过的，让光通过光谱仪，你会发现可以被称为化学指纹的特征。最明显的指纹特征主要是由环境压力和温度激发的化学物质形成的。在行星大气中，化学指纹非常丰富。如果一个星球上充满了动植物，它的大气层将富含生物标记，也就是生命的光谱证据。无论这种标志物是来源于生物（由某种或所有生命形式产生）、人类活动（由广义的智人物种产生），还是科技（由技术产生），这些证据都将难以隐藏。

除非他们碰巧生来就有内置的光谱传感器，进行太空搜索的外星人需要建造光谱仪来读取我们的“指纹”。但最重要的是，地球必须经过太阳前面（或其他光源前面），让光得以穿过我们的大气层并继续传到外星人那里。这样，地球大气层中的化学成分就能与光相互作用，留下可以观测的印记。

有些分子——氨、二氧化碳、水，在宇宙中到处都有，无论那里是否存在生命。但另一些分子，在有生命存在的环境中会特别多。另一个容易被检测到的生物标志物，是地球上的甲烷含量，其中2/3是由与人类有关的活动产生的，如燃料油生产、水稻种植、污水以及家畜的打嗝和放屁。其余1/3的甲烷来自自然环境，主要是湿地里分解的植被和白蚁的排泄物。不过，在自由氧匮乏的地方，甲烷并不总是需要有生命才能生成。此时此刻，太空生物学家们正在争论火星上微量的甲烷以及土卫六（泰坦）上大量甲烷的确切来源，我们推测那里并没有奶牛和白蚁。

如果外星人在我们绕太阳公转时跟踪地球的夜晚一侧，他们可能会注意到有钠元素出现，它来自大量使用的钠蒸气路灯。然而，最有说服力的证据是我们星球上那些自由飘浮的氧气，它们构成了我们足足1/5的大气。

氧——是宇宙中第三丰富的元素，排在氢和氦之后，具有很强的化学活性，并且很容易与氢、碳、氮、硅、硫、铁等原子结合。它甚至也与自己结合。因此，要让氧气含量保持在稳定的状态，一定是氧气释放

的速度跟它被消耗的速度一样快。在我们地球这里，氧气的产生可以追溯到生命身上。由植物和许多细菌进行的光合作用，在海洋和大气中产生自由氧。自由氧反过来又能使代谢氧气的生命得以存在，包括我们和动物王国中几乎所有其他生物。

作为我们地球人，我们已经深知我们星球独特的化学指纹的意义。但是，那些来到我们面前的遥远的外星人，将不得不解释他们的发现并检验他们的假设。钠的周期性出现是否一定是来源于科技？自由氧肯定是生物产生的，那么甲烷呢？甲烷的化学性质是不稳定的，有些来自人类活动，但是正如我们所看到的，甲烷也有非生命活动的来源。

如果外星人认为地球的化学特征是生命的确切证据，也许他们会想知道这种生命是否拥有智慧。想必外星人彼此有交流，也许他们也会相信其他的智慧生命也能互相交流。也许那时他们就会决定用射电望远镜监听地球，看看其居民所掌握的电磁波频谱是哪一波段。因此，不管外星人是用化学手段还是用无线电波来探索，他们可能都会得出同样的结论：地球是一个有先进技术的星球，那些技术是由智慧生命形式发展起来的，他们可能会致力于发现宇宙是如何运作的，然后又为个人利益或公众利益而应用那些科学规律。

如果外星人进一步分析地球大气的化学指纹，人类的生物标志物也将包括硫酸、碳酸和硝酸，以及化石燃料燃烧形成的其他成分。如果好奇的外星人碰巧在社会上、文化上和技术上比我们要先进得多，那么他们肯定会把这些生物标记解释为地球上缺乏智慧生命的有力证据。

****

第一颗太阳系外行星是在1995年被发现的，而在我写作本书时，统计数字正在上升到3000颗，大多数是在银河系里太阳系附近的一小块儿区域里发现的。所以，系外行星的数量应该还有很多。毕竟，我们的星系有超过1000亿颗恒星，而已知的宇宙蕴藏着数千亿个星系。

我们对宇宙中的生命的探索，驱动了对系外行星的搜索，其中一些行星在整体性质上与地球相似，虽然细节稍有差异。从目前的数据推测，仅在银河系就有多达400亿颗类地行星。将来，它们都是我们的后代可能造访的行星，当然最好是主动选择去访问，而不是迫不得已离开地球。

12　基于宇宙视角的反思

Reflections on the Cosmic Perspective

在人类创建的所有学科中，天文学被公认是而且无疑是最崇高、最有趣、最有用的。因为，通过这门科学所获得的知识，不仅地球之大部分被发现……；而且我们的能力随着它所传达的思想的宏大而扩展，我们的心灵因为超越了低级狭隘的偏见而得到升华。

——

詹姆斯·弗格森，1757[19]

早在有人知道宇宙有一个开端之前，在我们知道离地球最近的大星系有200万光年之前，在我们知道恒星如何发光或原子是否存在之前，詹姆斯·弗格森对他最喜欢的科学的热情介绍是如此真切。而且他说的话，除了18世纪的修辞，听起来就像是昨天写的。

但是谁会这样想呢？谁会来欢呼庆祝这个有关生命的宇宙视角？不是移民而来的农场工人，不是血汗工厂的工人，当然也不是在垃圾堆里翻找食物的流浪汉。你需要的是不必为了生存而付出全部时间的那种奢侈，你需要生活在政府重视探索人类在宇宙中的地位的国家，你需要生活在其中的智识追求可以让你做出前沿发现，并且你的发现可以被正常传播的社会。以这些作为标准，工业化国家的大多数公民都做得很好。

然而，这种宇宙视角也伴随着隐藏的代价。当我跨越几千千米去旅行，只为了在日全食期间在快速移动的月球阴影里度过一小会儿，有时我会忽视地球。

当我静下心来，思索我们膨胀的宇宙，嵌在不断延伸的四维时空中的众多星系疾速地飞离彼此，有时我会忘记无数行走在这个地球上的人还没有食物和住所，而且其中儿童的比例超乎寻常。

当我凝视那些证明在整个宇宙中存在神秘暗物质和暗能量的数据时，有时我会忘记每一天——地球每自转24小时——都有人以他们所信奉的神灵的名义杀人或者被杀，有些人不以神的名义杀人但以他们需要或想要的政治信条的名义杀人。

当我跟踪小行星、彗星和行星的轨道，它们每一个都是由引力精心策划的宇宙芭蕾舞剧中旋转的舞者，有时我会忘记太多的人的所作所为，他们无视地球大气、海洋和陆地之间微妙的相互作用，而其后果将导致我们的孩子和孩子的孩子付出健康和幸福的代价。

有时我会忘记，掌握权势的那些人很少会尽他们所能去帮助那些无法自救的人。

我偶尔会忘记这些事情，因为无论世界有多大——在我们的情感上，在我们的思想里，在我们超大的数字天图里——宇宙总是更大的。

对有些人来说这是个令人沮丧的想法，但对我来说这是一个获得解放的想法。

想想一个成年人如何看待孩子们认为大不了的创伤：打翻的牛奶、摔坏的玩具、擦伤的膝盖。作为成年人，我们知道孩子对什么是真正的问题一无所知，因为缺乏经验大大地限制了他们作为儿童的观念。孩子们还不知道这个世界不是围着他们转的。

作为成年人，我们是否敢于向自己承认，我们也有一个共同的不成熟的观念？我们是否敢于承认，我们的思想和行为来自一种全世界都围着我们转的执念？表面上不是。然而证据比比皆是。掀开那些种族、民族、宗教、国家和文化冲突的面纱，你会发现人类的自负正在不断膨胀。

现在想象一个世界，其中每个人，特别是有权势和影响力的人，对我们在宇宙中的位置拥有开阔的眼界。如果从这个视角出发，我们的问题就会缩小，或者根本不会出现，我们就可以避免我们的前人因为世俗分歧而屠杀彼此的行为。

****

早在2000年1月，重建后刚开放的纽约市海登天文馆[20]举办了一场名为《通向宇宙的护照》的太空秀[21]，这个活动带领游客们经历了一场从天文馆直到宇宙边缘的虚拟旅程。在这场秀中，观众观看了地球，然后是太阳系，接着又观看了银河系里的亿万星辰渐渐缩小成穹幕上一个几乎看不见的小点。

在开幕不到一个月时，我收到了来自常春藤盟校的一位心理学教授的信，他专门研究那些使人自觉渺小的事情。我从来不知道有人竟专攻这样的领域。他说他想对观众们进行一次观影前后的问卷调查，以评估他们在观看节目后的沮丧程度。他写道，《通向宇宙的护照》引发了他最强烈的渺小感和无意义感。

怎么可能呢？每次我看到太空秀（还有我们制作的其他节目），我都觉得自己充满力量和激情。人脑只有1400克重，而它产生的思维活动却能让我们找到我们在宇宙中的位置，这让我感到自己很强大。

请允许我指出，是这位教授，而不是我，误读了大自然。他这种毫无道理的自大，首先源于对所谓意义的幻想，另一方面“人是万物之灵长，宇宙之精华”的文化假设也助长了这种自负。

不过我也要为他说句公道话，我们大多数人都很容易受到人定胜天这类强势思维的影响。我曾经也是这样，直到后来我在生物课上学到“一厘米结肠里的细菌要比这个世界上存在过的人的总数还要多”。这类信息会让你对究竟是谁（或是什么）在实际掌控你我而思虑再三。

从那天起，我开始认为人类并非空间和时间的主人，而是作为一个伟大的宇宙存在链的参与者，与现存的和已灭绝的物种都有直接遗传联系，而且可以追溯到近40亿年前地球上最早的单细胞生命。

我知道你在想什么：我们比细菌更聪明。

毫无疑问，我们比任何曾经在地球上奔跑、爬行或匍匐的其他生物都更聪明。但我们有多聪明呢？我们烹调食物，我们谱写诗歌和音乐，我们从事艺术和科学，我们数学很好。即使你数学不好，你也比最聪明的黑猩猩好得多——它们的遗传特征与我们的差异微乎其微。无论如何，灵长类动物学家永远都找不到一只能做乘除法或三角几何的黑猩猩。

如果我们和我们的猿类近亲之间微小的基因差异，能解释表观上巨大的智力差异，那么智力上的这种差异也许并不那么巨大。

想象一种生命形态，他们的智力之于我们的差异，就像我们之于黑猩猩的一样。对于这样一个物种，我们的最高精神成就将是微不足道的。他们的幼儿不必是在芝麻街学习他们的ABC，而是在布尔大道学习多变量微积分[22]。我们最复杂的定理，我们最深奥的哲学，我们最有创造力的艺术珍品，只不过是他们的小学生带回家的随堂作业，用来让爸爸妈妈拿冰箱贴贴在冰箱门上展示的东西。这些生物将会研究斯蒂芬·

霍金（他在剑桥大学担任的教授讲席曾经由艾萨克·牛顿拥有），因为他比其他的人稍微聪明一点儿。为什么？因为他可以在头脑中做理论天体物理学和其他基本计算，但这样的智力水平也就相当于刚从外星人学前班放学回来的小孩子。

如果一个巨大的基因鸿沟将我们和我们在动物王国中最近的亲戚分隔开来，我们就可以理直气壮地赞颂我们的聪明才智。我们可能有资格四处炫耀，认为我们离我们的近亲物种很远且截然不同。但并不存在这样的鸿沟。相反，我们与自然的其余部分是一个整体，我们的位置既不高于也不低于自然，而是属于自然。

需要更多消除自负的例子？对数量、尺度和规模做简单的对比就可以很好地说明问题。

就拿水来说吧。水很平常，也很重要。一个250毫升杯子里的水分子的数目，比世界上所有海洋里的水按杯计算的数目还要多。这一杯水里的分子数目之多，能够匀出1500个分子到世界上的每一杯水中。无可回避的是：你刚才喝的一些水曾流经过苏格拉底、成吉思汗和圣女贞德的肾脏。

空气怎么样呢？也是至关重要的。你每一次呼吸吸入的空气分子数目，比在地球整个大气层里的空气按“一呼吸”计算的数目还要多。这意味着你刚才呼吸的空气曾经通过了拿破仑、贝多芬、林肯和比利小子[23]的肺部。

该说一下宇宙了。宇宙中的恒星数目比任何海滩上的沙粒还多，比地球形成之后经历的秒数还要多，比曾经生活过的所有人写下的文字和发出的声音还要多。

想看过去的全景吗？宇宙的视角将带你去那里。光从太空深处到达地球是需要时间的，所以你看到的天体和现象并不是它们现在的样子，而是它们曾经的样子，几乎能够追溯到时间本身的开端。在这个可推算的范围内，宇宙进化的全景连续不断地展开。

想知道我们是由什么构成的吗？又一次，宇宙视角提供了一个比你

的预期更让你震惊的答案。宇宙中各种化学元素是在大质量恒星尤其是其生命结束时发生剧烈爆炸的火焰中锻造出来的，这些元素丰富了它们所在的星系。结果呢？宇宙中四种最常见的活跃元素氢、氧、碳和氮，也是地球生命体中四种最常见的元素，碳更是生物化学的基础。

我们不只是生活在这个宇宙之中，宇宙就存在于我们的身体之中。

****

有说法认为，我们甚至可能不是来自这个地球。当多个独立的研究路线被放在一起考虑时，迫使研究人员重新考虑我们是谁，我们来自哪里。正如我们已经看到的，当一颗大个小行星撞击一颗行星，撞击点周围的区域获得的反冲能量，能把岩石抛入太空。岩石以这种方式可飞往其他行星，并在其表面着陆。还有，微生物的适应能力可以相当强。地球上的极端微生物可以在太空旅行中遇到的温度、压力和辐射范围内生存。如果撞击产生的抛射岩石来自一个具有生命的行星，那么微生物群就会藏在岩石的角落和缝隙中。再有，最近的证据表明，太阳系形成后不久，火星是湿润的，并且可能是适宜生命繁殖的，甚至上面的生命比地球上出现得还要早。

总的来说，这些发现告诉我们，生命可能始于火星，后来才来到地球上播种生命，这一过程被称为“有生源说”。因此，所有的地球人可能——只是可能——是火星人的后裔。

****

几个世纪以来，宇宙的发现一次又一次使我们对我们自身的看法降级。地球在天文学上曾经被认为是独一无二的，直到天文学家得知，地

球只是绕太阳运行的又一颗行星。然后我们推测太阳是独一无二的，直到我们得知，夜空中无数恒星其实都是太阳。然后我们认为我们所在的星系即银河系是整个已知宇宙，直到我们确定，天空中的无数模糊天体是其他星系，布满我们已知宇宙的图景。

今天，我们多么容易假设只存在这一个宇宙。然而，现代宇宙学新出现的多种理论，以及对不可能存在任何独一无二的事物的不断重申，要求我们继续包容对我们的独特性期冀的最新冲击：多重宇宙。

****

宇宙视角源自基础知识。但它又不仅仅是你所知道的知识，而是关乎拥有智慧和洞察力把那些知识用于评估我们在宇宙中的位置。它的特征是显而易见的：

宇宙视角来自科学的前沿，但它并不仅仅是科学家独占的。它属于每个人。

宇宙视角是谦逊的。

宇宙视角是精神上的——甚至是救赎的——但不是宗教的。

宇宙视角让我们能够以一种思想同时把握宏观和微观。

宇宙视角使我们的头脑对非凡的想法保持开放，但又不至于使我们脑洞太大以至于容易轻信我们被告知的任何事。

宇宙视角使我们睁开眼睛看宇宙，它不是被设计用于抚育生命的慈爱摇篮，而是一个寒冷、孤独、充满危险的地方，迫使我们重新评估所有人对彼此的价值。

宇宙视角表明地球是一颗尘埃。但它是一颗珍贵的尘埃，目前，它

是我们唯一的家园。

宇宙视角在行星、卫星、恒星和星云的图像中发现着美，同时也颂扬着塑造它们的物理定律。

宇宙视角使我们的眼界能够超越我们的环境，让我们超越寻找食物、住所和伴侣的原始需求。

宇宙视角提醒我们在没有空气的太空中，旗帜不会飘扬——这也许是象征着在太空探索中我们不必掺杂进任何狂热的爱国情绪。

宇宙视角不仅包含了我们与地球上所有生命的遗传亲缘关系，而且也珍视我们与在宇宙中任何尚未发现的生命之间的化学亲缘关系，以及我们与宇宙本身的原子亲缘关系。

我们每个人如果至少一周一次——即使不能一天一次——思考在我们面前有什么宇宙真理未被发现，也许就会诞生一位聪明的思想家、一个巧妙的实验或一个充满创新的太空项目。我们可能会进一步思考，那些发现将来有一天会如何改变地球上的生命。

如果没有这样的好奇心，我们就跟那些守着能满足自己所有需要的几十亩地，因而表示没有必要出门冒险的旧时代农夫没有什么区别。然而，如若我们所有的祖先都如此认为，那些农夫就会仍然是用棍子和石头追逐晚餐的穴居人。

在我们短暂停留在这个星球上的这段时间，我们欠我们自己和我们的后代一次探险的机会——部分原因是探索本身的乐趣。但还有一个更高尚的理由：当我们对宇宙的认识停止增长的那一天，我们就有可能面临着倒退到幼童式观点的风险，即我们固执地以为宇宙仍然围绕着我们转。在那个不容乐观的世界里，拥有武器却资源匮乏的人和国家将基于他们“浅陋而狭隘的偏见”采取行动。而那将是人类启蒙的劫难——直到一个充满远见，从而能够再次拥抱而不是畏惧宇宙视角的新文化的兴起。

致谢

感谢我的来自《博物》（Natural History）杂志的两位文字编辑：爱伦·戈尔登松（Ellen Goldensohn ）和艾维斯·朗（Avis Lang），感谢她们这么多年来的孜孜不倦，并力保这些文字完全表达了我的原意。

感谢我的科学编辑，也是我普林斯顿大学的同事兼好友罗伯特·拉普顿（Robert Lupton），在所有重要议题上，他比我懂得更多。

还要感谢贝特西·勒纳（Betsy Lerner），她的建议让我的书稿增色颇多。

1.开尔文（Kelvin），热力学温标或称绝对温标，用符号K表示。每变化1K相当于变化1℃，与摄氏度计算起点不同，开尔文是以绝对零度作为计算起点，即-273.15℃ = 0K。—译注 （如无特别标注，文中注释均为原作者注。）

2.Goldilocks zone，出自童话《金发姑娘和三只熊》，形容不多不少，不冷不热，刚刚好。——译注

3.这个段子的笑点在于Chuck Berry名字中的Berry也有莓果的意思，外星人误以为这是一种吃的。——译注

4.原则上，如果你因为肠胃胀气而放出的废气足够强大而且源源不断的话，是可以完成这个特殊才艺表演的。

5.1纳秒是1秒的十亿分之一，1皮秒是1秒的一万亿分之一。

6.激光干涉仪引力波天文台（LIGO）。LIGO由两台相同的探测仪组成，分别位于相距3000千米的美国华盛顿州的汉德福和路易斯安那州的利文斯顿。

7.测地线”是一个不必要的花哨字眼，它指的是弯曲的表面上的两个

点之间的最短距离—在这里引申为在四维的弯曲时空结构中两点之间的最短的距离。

8.在研究生院我上约翰·惠勒的广义相对论课时（在那里我认识了我的妻子）他经常这样说。

9.苏斯博士（Dr. Seuss，1904—1991），美国著名儿童文学作家、漫画家，创作过超过60本儿童书籍，代表作有《戴高帽子的猫》《霍顿听到了呼呼的声音》等。——译注

10.由Armageddon变形而来，这个词意为（《圣经》中说的）世界末日的善恶大决战。——译注

11.事实上，地球是我最喜欢的星球，然后才是土星。

12.直到19世纪中期，当物理学家的光谱仪被应用于天文问题时，天文学家才变成了天体物理学家。在1895年，著名的《天体物理学杂志》（Astrophysical Journal）创立时，它的副标题是“光谱学和天文物理学国际评论”。

13.威廉·赫歇尔，关于太阳和在地面射线里的异常热量，英国天文学联合会，哲学学报（Philosophical Transactions），1800年，17期。

14.安东尼·范·列文虎克，致伦敦皇家学会的信，1676年10月10日。

15.所有的波均遵循简单的等式：速度＝频率×波长。速度固定时，如果增加波长，频率则下降，反之亦然。这个规律对于任何以波形式传播的光线、声音，甚至是在运动场上球迷欢呼形成的“人浪”都成立。

16.卡尔·央斯基，显然来自地外源的电子干扰，无线电工程师学院学报，21期，10卷（1933）：1387页。

17.皮米（picometer或pm），1皮米相当于1米的一万亿分之一。

18.不，不是冥王星。请忽略它。

19.詹姆斯·弗格森（James Ferguson，1710—1776，英国天文学

家），引自《运用艾萨克·牛顿爵士的原理解释天文学，并且使那些没有学过数学的人容易理解》（伦敦，1757）。

20.作者任馆长的天文馆。——译注

21.《通向宇宙的护照》（Passport to the Universe）是由安·德鲁扬（Ann Druyan）和斯蒂文·索特（Steven Soter）合写的，他们也是科普纪录片《宇宙：时空之旅》（Cosmos：A Space-Time Odyssey）的合著者，该片由作者主持。他们还与卡尔·萨根（Carl Sagan）联手创作了1980年的经典纪录片《卡尔·萨根的宇宙》（Cosmos：A Personal Voyage）。

22.布尔代数是数学的一个分支，它处理的变量表示为真值或假值，通常由0和1表示，并且是计算机运行的基础。得名自18世纪英国数学家乔治·布尔（George Boole）。

23.9世纪美国西部著名罪犯。——译注



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

未讀

THE PLEASURE OF FINDING THINGS OUT

〔精装珍藏版〕

发现的乐趣

〔美〕理查德·费曼 __ 著　弗里曼·戴森 __ 作序　朱宁雁 __ 译

做一个有趣的人，
比做一位物理学家更难

诺贝尔奖得主、顽童物理学家
理查德·费曼
诞辰100周年纪念

费曼演讲·访谈集

THE BEST SHORT WORKS OF RICHARD P. FEYNMAN

版权信息

发现的乐趣

THE PLEASURE OF FINDING THINGS OUT

作者：[美] 理查德·费曼（Richard P. Feynman）

译者：朱宁雁

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

版权信息
序 我顶礼膜拜的偶像
编者导语
1 发现的乐趣
2 未来的计算机
3 从加入“曼哈顿计划”到亲眼看到原子弹爆炸
4 科学文化在现代社会中扮演什么角色？应该扮演什么角色？
5 底下还有大量的空间—对纳米技术的展望
6 科学的价值
7 关于“挑战者号”航天飞机事故的少数派调查报告
8 科学是什么
9 世界上最聪明的人
10 货拜族科学：探讨科学、伪科学以及学习如何不自欺
11 就像1，2，3那样简单
12 理查德·费曼构建一个宇宙
13 科学和宗教的关系
鸣谢
返回总目录

序　我顶礼膜拜的偶像

伊丽莎白一世时期的剧作家本·琼森（Ben Jonson）曾撰文写道："我确实热爱此人，狂热程度不亚于任何一种偶像崇拜。""此人"指的正是琼森的良师益友—威廉·莎士比亚。琼森和莎士比亚都是卓有成就的剧作家。琼森是一位饱学之士，颇有学者气质；而莎士比亚则是个天才，不拘小节。所谓的"文人相轻"在他们之间根本不存在。莎士比亚比琼森年长9岁，在琼森开始创作前，他的经典名剧就已经登上了伦敦各大舞台。正如琼森所言，莎士比亚"待人真诚，率性坦然"，不仅对他这位年轻的文友鼓励有加，还不吝奖掖后进。莎士比亚对琼森最有力的扶持就是在1598年琼森的第一部戏剧《人各有癖》（Every Man in His Humour）首演时，他亲自担纲主演。这部戏轰动一时，琼森就此开始了剧作家的职业生涯。那年，琼森25岁，莎士比亚34岁。在这之后的岁月里，琼森继续创作诗歌和剧本，他的许多剧本都交由莎士比亚的剧团演出。琼森凭自己的努力成为一位蜚声于世的诗人和学者，身后得以入葬威斯敏斯特教堂。但是他从未忘怀老朋友对他的提携之恩。莎士比亚去世后，琼森写了一首挽诗，"致我最敬爱的大师—威廉·莎士比亚"，诗中有这样的名句：

"他不属于某一个时代，而属于所有世纪。"

"尽管你不大懂拉丁，更不通希腊文，

我不到别处去找名字来把你推尊，

我要唤起雷鸣的埃斯库罗斯，

还有欧里庇得斯、索福克勒斯，……

也唤回人世来，听你的半统靴登台。”

“天籁本身以他的心裁而得意，

穿起他的诗句来好不欢喜，……

然而我决不把一切归之于天成：

温柔的莎士比亚，你的工夫也有份。

虽说自然就是诗人的材料，

还是靠人工产生形体。谁想要

铸炼出体笔下那样的活生生一句话

就必须流汗，……

团为好诗人靠天生也是靠炼成。”

琼森和莎士比亚的故事跟理查德·费曼有什么关系吗？答案很简单——我可以照搬琼森的原话：“我确实热爱此人，狂热程度不亚于任何一种偶像崇拜。”由于命运的眷顾，我有幸拜费曼为师。1947年，我从英国来到康奈尔大学求学，自以为学识渊博，颇有学者风范，可是费曼这个不拘小节的天才立马让我心悦诚服并甘愿拜在其门下。仗着年少轻狂，我自比为琼森，将费曼比作莎士比亚。我不曾指望在美国遇到莎士比亚那样的导师，但是这样的人一旦出现在我面前，我就会一眼把他认出来。

在遇到费曼之前，我已经发表过许多数学论文，这些论文净卖弄些小聪明，含金量不高。当我一遇到费曼，我就知道自己已经置身另一重境界。费曼对发表华而不实的论文毫无兴趣。能让他为之奋斗的事业是：通过彻底重建物理学来理解大自然的工作机理。我还从未见过任何人能像他那样孜孜探索、不懈奋斗。我很幸运，在他八年的奋斗接近尾声之时遇见他。七年前，当他还是约翰·惠勒（John Wheeler）的学生时所设想的新物理学，这时终于初见雏形，他称之为“时空方法”（the space-time approach）。在1947年，这套学说还尚显粗糙，有些问题还

没有解释清楚，还有诸多自相矛盾的地方。但是我一眼就断定它必定是正确的。我抓住每一个机会用心聆听费曼讲话，努力去理解他恣肆汪洋的科学见解。他喜欢侃侃而谈，也欢迎我这个听众。我们成了终生挚友。

接下来的一年时间里，我见证了费曼不断完善他那一套用图形和图表解释大自然的方法，最终将遗留问题一一解决，并捋顺了所有前后矛盾的说法。然后，他开始利用这些图表计算数值。他可以用惊人的速度计算出完全可与实验结果相媲美的数值，也就是说，实验得到的结果跟他计算出的数值完全吻合。1948年夏天，我们亲眼见证琼森的话变成现实："天籁本身以他的心裁而得意，穿起他的诗句来好不欢喜。"

也正是在那一年，我一边和费曼散步、聊天，一边研究物理学家朱利安·施温格（Julian Schwinger）和朝永振一郎（Sinitiro Tomonaga）的理论，他们走的是一条更传统的路子，得出的结论却与费曼的类似。施温格和朝永振一郎各自独立开展研究，他们运用更费力也更复杂的方法，成功计算出了一些数值，而这些数值跟费曼利用他的图表中轻轻松松直接得到的数值如出一辙。施温格和朝永振一郎并没有重建物理学，他们在传统物理学的框架内引入了一些新的数学方法从而得出那些数值。当我发现他们的计算结果显然与费曼的数值一致时，我知道老天赐予我一个难得的机会：我可以对这三种理论进行研究对比。我写了一篇论文，标题为《朝永振一郎、施温格和费曼的辐射理论》，文中我阐释了这三种理论为何看似不同而实质上却是一样的。我的论文发表在1949年的《物理评论》上，就此开启了我的职业生涯，其意义正如《人各有癖》之于琼森。那一年我25岁，和当年的琼森同龄；而费曼才31岁，比1598年时的莎士比亚还年轻3岁。我努力以同样尊崇的态度对待这三位物理学家的理论，但我心里明白：这三人中最伟大的还得数费曼，而我写那篇论文的主要目的就是让世界各地的物理学家更容易接受他那些革命性的思想。费曼非常支持我发表他的思想，从未抱怨我抢了他的风头。而他才是我这出戏里的领衔主角！

我从英国带到美国来的一件心爱之物是J.多佛·威尔逊（J.Dover Wilson）所著的《莎士比亚传略》（The Essential Shakespeare）。这是莎士比亚的一本小传，我文中引用的琼森的话大部分都摘自此书。威

尔逊的书既不是虚构的小说，也不是历史文献，而是介乎两者之间。威尔逊以琼森等人的第一手资料为基础，运用自己的想象力，将其与珍稀的历史文献相结合，努力还原莎士比亚的生平。特别值得一提的是，莎士比亚出演琼森剧目的最早证据来自一份1709年的文献，其时距此事件已有100多年了。我们知道，莎士比亚既是一位著名的作家，也是一位出色的演员。我认为人们没有理由去质疑威尔逊笔下的这个老故事。

幸运的是，记录费曼生平和思想的文献并非为数寥寥。这本书就是这些文献资料的一个合集，它记录了费曼演讲和接受采访时的音容笑貌，还有他的几篇随笔。这些文献资料都是非学术性的，面向的对象是普通大众而不是从事科研的圈内人。我们从中可以看到一个真实的费曼—他一直在玩着思想的游戏，但是对自己看重的东西却始终抱着严肃认真的态度。他看重的是诚实、独立以及坦然承认自己无知。他讨厌把人分作三六九等，乐于跟各行各业的普通人交朋友。在人生这个舞台上，他跟莎士比亚一样，也是一位有喜剧天赋的演员。

除了对科学抱有异乎寻常的热情，费曼还喜欢跟朋友开玩笑并乐此不疲；他对各种俗世的乐趣也兴致盎然。我认识费曼一周之后，在写给父母的信中这样描述他："一半是天才，一半是滑稽演员。"在倾心尽力探究自然规律之余，费曼喜欢与朋友们一起娱乐消遣：他喜欢打他的邦戈鼓，喜欢恶作剧或者讲故事来逗每个人开心。在这方面，他与莎士比亚也很相似。我从威尔逊的书中摘抄了琼森的这段记述：

"他会夜以继日专心写作，一刻也不放松，直至累到虚脱才罢休；而一旦停下工作，他就会沉迷于各种运动和娱乐之中，这时想将他拉回到书桌前根本没戏；但是当他彻底放松后重新拿起笔时，他的创作欲望就会变得更强烈，更热切。"

莎士比亚是这样，我顶礼膜拜的偶像—我熟知和热爱的费曼也是这样。

弗里曼·戴森

于新泽西州普林斯顿高等研究院

编者导语

最近我参加了在哈佛大学庄严的杰斐逊物理实验室（Jefferson Lab）举办的一场讲座，主讲人是罗兰德科学院的莱娜·豪（Lene Hau）博士。不久前她做的一个实验不仅被著名的科学杂志《自然》报道，还上了《纽约时报》的头版。在实验中，她（和她的研究团队—成员既有学生，也有科学家）让激光束穿过一种叫“玻色-爱因斯坦冷凝物”的新物质（一种特殊的量子态，一堆原子被冷却到几近绝对零度，几乎停止运动；而它们的整体行为则像是单个的粒子），这种新物质使光束的速度降低到令人难以置信的程度—每小时38英里（约61千米）。我们知道，光的传播速度极快，在真空里为每秒钟186000英里（约30万千米），即每小时669600000英里；而光通过任何介质时，比如通过空气或玻璃时，它的速度只会减慢一点点，几乎可以忽略不计。现在我们做一个计算，拿38英里/小时除以6.696亿英里/小时，计算结果是0.00000006，也就是说，这个速度是光在真空中传播速度的一亿分之六。打个比方，伽利略从比萨斜塔上投下来几个铁球—如果铁球的速度也减慢那么多的话—两年后这些球才落到地面上。

这个讲座令我大为震撼（我想，即便是爱因斯坦在场，他也会很震惊吧）。我平生第一次有点儿感受到理查德·费曼所说的“发现的震撼”，那是一种突如其来的感受（可能类似于顿悟，虽然这次只是间接的）。我会觉得自己已经攫住了一个美妙的新想法，感到这个世界多了一点新鲜的东西，并意识到自己正在见证一个重大的物理事件，其戏剧性或激动人心之处，并不亚于传说中牛顿在那一刻的感觉—当他意识到，导致苹果砸到他头上的那种神秘的力量其实就是使月球绕着地球旋转的力量；那种感觉就像费曼在理解光和物质相互作用的本质的道路上迈出了蹒跚的第一步时的感受—那关键的一步最终为他赢得了诺贝尔奖。

坐在听众席里，我仿佛感觉费曼就坐在我的身边，探头凑在我耳边轻声说：“你看到了吗？这就是科学家坚持研究的原因，这就是我们为了

获取一丁点儿的知识奋不顾身的原因。为了寻找一个问题的答案，我们要通宵达旦地工作；为了更深入理解一个问题，哪怕是增加一点点的认识，我们也要翻越最险峻的高峰；而最终有所发现时的欢欣愉悦，仅仅是探究世界的乐趣的一部分而已。”[I]费曼总是说，他研究物理既不是为了荣誉，也不是为了获奖和拿奖金，纯粹只是因为乐在其中—发现大自然的运行规律，其中自有一番乐趣。

费曼留给我们的宝贵财富是他全身心投入科学研究以及忠实践行科学的精神——这包括科学的逻辑架构和研究方法、拒绝教条主义，还有对质疑精神的无限包容。费曼相信—而且这是他的生活信念—如果人们本着负责任的心态运用科学，科学不仅能给人带来乐趣，而且对未来的人类社会有着不可估量的价值。像所有伟大的科学家一样，费曼喜欢和同事—还有科学的门外汉—分享他对自然规律的好奇。最能体现他对知识孜孜以求的例子，莫过于费曼的这本短文集（其中大部分都发表过，只有一篇没有公开发表过）。

要理解费曼的神奇和过人之处，最佳途径就是阅读这本书。在书里你会发现费曼涉猎很广，不只是物理，他对很多问题都有深邃的思考，并能娓娓道来，引人入胜。他谈到了教学的艺术—在这方面无人能出其右，他还谈到宗教、哲学和自己初涉学术界的生涩经历；未来的计算机和纳米技术—他是这个领域的先驱；常怀谦逊之心，从事科学工作的乐趣，以及科学和文明的未来；崭露头角的科学家应该如何看待这个世界；还有官僚阶层可悲的无知—这直接导致了“挑战者号”航天飞机事故的发生，他那份（调查）报告一下子占据了报刊的头条，并使“费曼”这个名字家喻户晓。

值得注意的一点是，这些短文鲜有重复的地方，但是有少数几处费曼会再次提及一些事情，于是我就做主删掉其中一处，以免读者重复阅读。在被删除的那一处，我会插入省略号（……）标注一下。

费曼不甚注重语法，这一点在本书中体现得很明显—那是由于本书有大量的篇幅都是从演说或访谈转录成文字的。为了保留费曼言谈间的神韵，因此，一般情况下，我不会改动他那些不合乎语法规定的表达。不过，遇到以下这些情况，比如文字转录工作质量不高，或是录音不连

贯，从而造成字句不好理解，或是用词怪异，我会做一些必要的修改。我认为这种处理对费曼的本意丝毫无损，文章读上去还是费曼的风格，而可读性更强了。

生前备受赞誉，身后推崇不减，费曼一直是社会各阶层人士汲取智慧的源泉。本书精选费曼的精彩演讲、访谈及其撰写的文章，我期待费曼的忠实追随者和初次领略到费曼之特立独行和桀骜不驯的人们—不仅仅限于这个时代—能从中受到鼓舞，并享受亲近费曼思想的乐趣。

打开这本书，享受阅读的乐趣吧！在阅读过程中不妨不时开怀大笑几声，或者从书中学得一二人生经验，或者汲取一些灵感，但是最重要的是，你将体会到探究一个非凡人物的乐趣。

感谢米歇尔·费曼和卡尔·费曼一直以来慷慨无私的帮助；感谢加州理工学院档案馆的朱迪思·古德斯坦博士、邦妮·路德博士和谢莉·欧文博士，感谢你们古道热肠、倾情相助，我们得以编成此书离不开你们的帮助；在此特别要感谢弗里曼·戴森教授，他为本书撰写的序言雅致隽永、启人心智。

我还要感谢约翰·格里宾、托尼·海伊、梅拉妮·杰克逊和拉尔夫·莱顿，他们在成书过程中时常给予我们精妙的建议。

杰弗里·罗宾斯

于马萨诸塞州雷丁镇

1999年9月

1 发现的乐趣

此篇为电视访谈文字整理版。1981年，BBC科普节目《地平线》采访了费曼，这期节目后来在美国的科普节目《新星》上播出。其时费曼已进入人生暮年（费曼于1988年去世），我们在节目中看到的是一位睿智的长者在反思自己的人生历程和此生成就—唯有历经岁月洗礼方能有此番感悟。采访中，费曼言谈率直、轻松，饱含感情，他谈了很多内心的想法：为什么说仅仅知道一个事物的名称其实等同于对其一无所知；当广岛成千上万人遭受原子弹荼毒之际，他和他的同事—曼哈顿计划的原子物理学家们，即原子弹这种可怕的武器的研发团队—何以能够痛饮狂欢、庆贺胜利；还有，为什么说即便没有得诺贝尔奖，费曼照样也能把自己的人生过得很精彩。

科学家眼中的花之美

我有一个朋友，他是个艺术家，他有些观点我真是不敢苟同。他会拿起一朵花，说道：“看，这花多美啊！”是啊，花很美，我也会这么想。他接着会说：“你看，作为一个艺术家，我会欣赏花的美；而你是个科学家，只会职业性地去层层剖析这花，那就无趣了。”我觉得他在胡扯。首先，我相信，他发现花很美，其他人和我也能看到，不过，我可能没有他那样精妙的审美感受，但是毋庸置疑，我懂得欣赏花的美。而我同时还能看到更多的东西：我会想象花朵里面的细胞，细胞体内复杂的反应也有一种美感。我的意思是：美不尽然在这方寸之间，美也存在于更小的微观世界，这朵花的内部构造也很美。事实上，一些进化过程很有意思，比如，一些花开始有了颜色，就是为了吸引昆虫为自己授粉；这就意味着昆虫也能看到颜色。这就带来一个问题了：低级动物也能感受到美吗？为什么能称之为“审美体验”呢？所有这些有趣的问题都说明了一件事：科学知识只会增加花的美感和神秘感，人们对花更加兴趣盎然、惊叹不已。是的，只增不减，我弄不懂为什么有人不这么想。

关于偏科

我向来就偏科偏得厉害，早些年，我几乎把所有的精力都投入到学习自然学科上面。我没有时间，也没有耐心去学习所谓的人文学科，即便是大学里那些必修的课程。我尽量逃避学习这些课程，不愿在那上头花费精力。后来，我年岁大了一些，生活节奏没那么快了，我的兴趣也多了那么一点点。我学了画画，也开始阅读一些书。但是总的来说，我还是偏科很厉害的一个人，我知道的东西很有限。我的智慧有限，我只把它用在一个特定的地方。

父亲教育我的方式

我们家有一套《不列颠百科全书》，当我还是小孩子的时候，我爸爸就经常让我坐在他腿上，给我读这套书。我们读恐龙那部分，可能那里描述了雷龙或者暴龙什么的，书上会这么写：“这家伙有25英尺（约7.6米）高，脑袋有6英尺宽（1.8米）。”这时，我爸爸就停下来，说：“我们来看看这句话什么意思。也就是说，假如那东西站在我们家的前院，它那么高，足以把头伸进楼上的窗户。不过呢，由于它的脑袋比窗户稍微大了些，它要是硬把头挤进来，就会弄坏窗户的。”

凡是我们一起读过的内容，爸爸都会尽量用现实生活中的事物来解释。就这样，我学到了一个方法—无论我读到什么内容，我总要设法通过这种思考方式，弄明白它到底在说些什么（笑）。你看，我小时候读《不列颠百科全书》就养成了这种习惯。那时想到院子里有这么一个庞然大物，这真的会让一个小孩子很兴奋。当然，我不害怕当真会有那么一个大家伙把头伸进我家的窗户里。但是想想看，这些庞然大物突然一下子就灭绝了，而且没有人知道其中的原因，这真的非常、非常有意思。

那时候，我们常去卡茨基尔山度假。平时，我们住在纽约，卡茨基尔山是人们消夏的地方。去那里度假的人很多，但平日里父亲们都去纽约上班，周末才回到山中。我爸爸回来时，会带我去树林里散步，并且引导我观察树林里正在发生的各种有趣的事情—稍后我会详细说说这些事情—其他孩子的妈妈看到我爸这么做，觉得这种做法简直太棒了，她们想让自己的丈夫也带上儿子去散步，可是他们不干；于是她们又去求我爸带上所有的孩子去散步，我爸也不干，因为他和我就像哥们儿一样—我们更愿意两人待在一起。这些妈妈只好作罢，等到下个周末的时候，那些爸爸不得不带着自己的孩子去散步。周一，爸爸们都回纽约上班了，我们小孩子在田野里玩。一个小伙伴问我：“你看！你知道那是什么鸟吗？”我说：“我可不知道。”他得意扬扬地说：“这是brown throated thrush”，他又加了一句，“你爸什么也没教你。”但事实恰恰相反，我爸教过我。他指着那只鸟对我说：“你知道这是什么鸟吗？这是brown throated thrush，在葡萄牙语里，它叫……，在意大利语里，它

叫……”，他还会说，“在汉语就叫……，用日语叫是……”等等。“你看，”他说，“你知道这鸟的名字，就算你会用世界上所有的语言去称呼它，你其实对这鸟还是一无所知。你所知道的，仅仅是不同地方的人怎么称呼这种鸟而已。现在，我们来好好看看这只鸟。”

通过这些事，父亲教导我要去“观察”事物。有一天，我在玩一种小孩子拉着玩的叫“货运快车”的玩具，小车斗四周有一圈栏杆，车斗里有一个球—我记得很清楚，里头有一个球—我拉着玩具车，注意到小球滚动了，我就跑去跟爸爸说：“爸，我发现了，当我拉着车往前走，球会往后滚；我突然停下来，球就会向前滚。这是怎么回事？”他回答说：“谁知道怎么回事呢？一般来说，运动着的东西会继续运动下去；静止的东西也会保持不动，除非你用力去推它们。”他接着说：“这就叫作惯性，没有人知道怎么回事。”这就需要深入理解这种现象了—他没有光告诉我一个物理概念，他很清楚：知道一个概念和真正懂得这个概念有很大区别，而我很早也知道这一点。他接着说：“如果你仔细观察，就会发现球并没有向后滚，而是你拉着车向小球移动；那小球是静止不动的，或是由于摩擦力的作用在向前移动，而不是向后移。”于是，我重新跑回来，把球又放在车斗里，然后从旁边观察。我发现爸爸说的是对的！我拉着车往前移动的时候，小球并没有往后跑，它是相对于车斗往后移动；但是相对于侧面，小球稍稍往前移动了一点，可以说是车斗的移动超过了小球而已。这就是我爸爸教育我的方式，活生生的例子，接着是探讨问题，这个过程毫无压力，都是些轻松有趣的讨论。

实干家如何学知识

我表哥比我大三岁，那时他念中学。代数这门课，他学得很吃力，所以就请了个家教。老师给他补课时，允许我待在旁边（笑）。那老师努力地教我表哥“2x＋……”之类的代数问题。我问他：“你在算什么？”因为我听到他说到了x。他答道：“你个小孩子知道什么？2x＋7＝15，要算出x等于多少。”我说：“4啊。”他回答：“对的，可是你是用算术做出来的，不是用的代数。”这就是我表哥永远学不好代数的原因，因为他都不明白自己应该怎么学。这真是没有办法。幸运的是，那时我没上学，所以我学代数就知道一个目标，那就是算出x，不管你用什么办法—你知道，世界上没有这么一回事：这个问题你必须用算术做，那个必须用代数做。学校生造出这么个东西是不对的，其实那些被迫学习代数的孩子完全可以不用学那个。那些人鼓捣出一套规则，你要是照做的话，根本不用动脑子也能算出答案：等式两边都减去7，假如还有一个乘数，那就两边再除以这个乘数，等等，走完这些步骤你就可以得到答案，即便你根本不理解自己在做什么。

数学教材从浅到深是这样编排的：先是《实用算术》，再是《实用代数》，然后是《实用三角学》。我学了三角学，但是很快就忘了，因为我不是很理解。后来图书馆打算进这套书中最新的一本《实用微积分》。我读了《不列颠百科全书》，知道微积分很重要也很有意思，我一定要学微积分。那时我大了一点，可能有13岁了。等这本书来的时候，我很兴奋地跑到图书馆去借，图书管理员看着我说：“啊，这么大点一个孩子，你借这本书干吗？那可是给大人看的。”我记忆中有那么几次尴尬的经历，这算是一次。于是我撒了个谎，说是替我爸爸借的，是他要看。最后我把书拿回了家，开始自学微积分。我给爸爸解释微积分，他从这本教材的最开头读起，却发现微积分很难懂。这真让我有点儿难过：我不知道他竟然也有学不会的东西，他不懂书上那些东西；而我觉得那些很简单、一目了然。这是我第一次发现自己在某些地方比他懂得多。

不向权贵低头哈腰

父亲教我物理知识（笑）—不管他说得对不对，他还教我不要向权贵低头哈腰……有那么几件事情。比如说，我还是个小男孩的时候，轮转影印技术刚刚出现，也就是在报纸上能印照片了—《纽约时报》是最早采用这一技术的。他经常让我坐他腿上，翻看报纸上的照片。有一天是教皇的照片，他面前所有人都向他鞠躬。父亲说：“瞧这些人，一个人站着，其他的人都在向他鞠躬。他们有什么区别吗？嗯，这个是教皇。”—他向来不喜欢教皇—他接着说：“区别在于有没有肩章。”—当然，教皇的礼服上没有肩章，将军的制服上才有—但是，那个标志性装饰（肩衣，译者注）就在礼服肩部这个位置，“和普通人一样，他要吃饭，也要上厕所；他也是人，和其他人没什么区别。为什么那些人要向他鞠躬呢？只是因为他有教皇这个头衔，他坐在这个位置上，因为他穿着教皇的礼服。并不是因为他做了什么了不起的事情，或者声望很高，诸如此类的原因。”顺便说一下，我爸是做制服生意的，所以他很清楚一个人穿上制服和脱下制服有什么区别，可是在他看来，穿不穿制服同样都是人。

我爸跟我在一起很开心，我相信这一点。有一次，我从麻省理工学院回家—我在那里已经学了几年了，他对我说：“这类知识，你现在已经学了不少了。有个问题，我一直理解不透，你是学这个的，我想让你给我说说。”我就问他什么问题。他说，他知道当一个原子从一种状态跃迁到另一种状态时，会释放出一个叫作“光子”的光粒子。我说：“是这样。”他接着问：“那么，这光子原本就在原子内部吗？”我说：“原子里本来没有光子，电子做了一次跃迁，就产生了光子。”他继续追问：“那么，它从哪儿蹦出来的？它是怎么出来的呢？”当然，我可不能这样跟他说：目前大家的观点是，原子内部不存在什么光子，电子运动才能产生光子。我也不能这样向他解释：比如我现在出声说话，可是这声音并不在我身体里面。我的小儿子可不这样理解，他在学说话时，突然说自己说不出的一个词—“猫”这个词—因为他的“词汇口袋”里没有“猫”这个词了（笑）。其实，你身体里并没有“词汇口袋”这个东西，在你想说出这个词的时候它却用完了，你只是在说话时说出了这个词。同样地，原子里也没有“光子袋”，光子出现的时候，它们并不是从什么地方出来的。

我只能这样去解释，没办法说得更明白一些。我始终没有能够把他不理解的东西讲明白，他对此不太满意（笑）。想想他也不算很成功，一路供我上了那么多学，就是为了找出这些问题的答案；可是他自己没能弄明白这些事情（笑）。

关于参加原子弹研制工作

[当他写博士论文的时候，费曼受邀参加原子弹研制工作。]这工作和我原来的研究完全不一样。这意味着我不得不中断手头的工作，腾出手做另一件事。一边是自己心爱的研究；一边是我认为自己有责任做的事情，为了保卫我们的文明。不是吗？所以，我思想斗争很激烈。当时，我的第一个反应是，我不愿意打乱自己的正常生活去做这件不同寻常的事情。当然，这里还有战争的伦理问题。我不想和这个问题扯上关系，但是当我认识到这个武器的杀伤力时，我震惊了。如果这种武器能被造出来，那么这种伤害就会存在。当时也没有迹象表明，我们能研制这种武器，而他们造不出来。所以加紧合作来完成这个工作很重要。

[1943年初，费曼在洛斯阿拉莫斯[1]加入了奥本海默[2]的团队]关于战争伦理问题，我确实有些话要说。启动这个项目的初衷是对付德国人，因此我加入进来，第一期工作最初在普林斯顿开展，然后移到洛斯阿拉莫斯。我们努力研制原子弹，所有的努力都是为了重新设计这颗原子弹，使它的威力更大。团队里的每个人都拼命工作，合作得很好。像这样一个项目，只要你决定去做，你就会坚持到底，直到成功。但是我所做的—我要说，这么做是不道德的—是忘了我刚才说的参与这个工作的初衷，因为德国战败后，制造原子弹的理由就改变了，而我压根儿没有想到这个问题，我没有去思考自己为什么还要继续干这个，我根本没有往这方面去想，难道不是吗？

成功与痛苦

［1945年8月6日，原子弹在广岛被引爆］我能记得的唯一反应—也许我会被自己的感觉蒙蔽—就是非常激动和兴奋。到处是狂饮欢庆的人群，洛斯阿拉莫斯和广岛可谓一个是天堂一个是地狱。我也加入了狂欢的队伍，灌了很多酒，坐在吉普车的车盖上—引擎罩—打鼓，车载着兴奋的我们满城转。而与此同时，广岛的人民则在死亡线上挣扎。

在这场特殊的战事之后，我的情绪反应很强烈。也许是因为原子弹，也可能是其他心理原因—我太太去世了。我记得，广岛原子弹爆炸后不久，我和妈妈在纽约一家餐馆吃饭，我脑子里就会把原子弹和纽约这个城市联系起来。我清楚投到广岛的原子弹的威力，也知道它爆炸时波及的范围有多大。拿纽约来说，当时我们吃饭的地方可能在第59街—我记不大清楚了，如果在34街投下一枚原子弹，那么冲击波会一路蔓延到我们所在的第59街：这一片地区的所有人都会死掉，所有的东西都会被毁掉。可怕的是，不是只有一枚原子弹，它们很容易被大量制造出来。我很早就知道这个情况—比那些持乐观态度的人要早得多，所以在我看来，所有东西都是注定要被毁掉的。国际关系和人们的行事方式没有什么改进，所以和其他事情一样，人们对原子弹的使用也会走上老路。因此我坚信人们很快就会再次动用原子弹。所以我很不安，我觉得，应该是我坚信这点，现在看来是有些杞人忧天。那段时间，我看到人们造一座桥，我就会说：“这些人不了解时局啊！”我确实觉得，建造任何东西都是没有意义的，因为它们很快就会被摧毁，可是他们就是不明白这个。看到任何一个建筑工程，我都会有这种古怪的想法。我总是会想：这些人多傻啊，费这个劲去建造这些东西！当时我确实处于抑郁状态。

我没有义务去成全别人对我的期望

［战后费曼去了康奈尔大学与汉斯•贝特[3]共事。他谢绝了普林斯顿高等研究院提供的一份工作。］他们肯定认为，给我这么一份工作我一定会干得很出色。可是我并不想成为他们希望的样子，同时我也有了一个新的做事原则，那就是我没有义务去成全别人对我的期望。这样一来，我就会轻松一些；我对自己说，你过去没有干成惊天动地的事情，以后也不会做成什么大事。但是我向来喜欢物理和数学，因为我都是带着兴趣去研究它们，很快我就做出一些研究成果，而这些研究后来帮我获得了诺贝尔奖。[4]

诺贝尔奖—够格吗？

［费曼因其在量子力学的成就获得诺贝尔奖］我做的工作—另外还有两个人在做同样的努力，日本的朝永（振一郎）和（朱利安·）施温格—就是找出办法去控制、分析和探讨1928年创立的电磁量子理论；如何去破解它、避免其局限性；如何计算出正确的结果并能被到目前为止的所有实验印证，也就是量子力学理论适用于实验的每一个细节—不包括核试验—1947年我做的就是这个事情，因为这个，我得了诺贝尔奖。

［BBC记者问：这项工作够资格得诺贝尔奖吗？］事实上（笑）我对诺贝尔奖一无所知，我不知道设立它的目的和它的评奖标准。如果瑞典皇家科学院的人们决定了某某人获诺贝尔奖，那就是合乎他们的标准了。我不会为了获这个奖而刻意去做什么……这很痛苦……（笑）。我不喜欢这些荣誉，可我感谢这个奖承认了我的工作，我也感谢那些赞赏我的工作的人。我也知道有很多物理学家在使用我的成果，我真的很知足了，我觉得没有比这更有意义的事情了。瑞典皇家科学院的某位专家认为我这项工作够资格拿诺贝尔奖，我并不觉得这有什么了不起的—我已经获得了奖赏，奖赏就是发现的乐趣以及看到人们运用我的研究成果，这都是真真切切的奖赏，而荣誉对我没有意义。我不追求荣誉，荣誉是个烦人的东西，在我心目中，荣誉就是肩章，荣誉就是人们穿的制服。从小我爸爸就是这么教我的。荣誉这东西，我无福消受，它只会伤害我。

念中学的时候，我获得的一个荣誉是成为“阿里斯塔”的一个成员，那是成绩好的学生的一个组织—呃—几乎每个学生都想成为其中一员。我进入这个学生社团后，发现他们开会就是坐下讨论还有哪个学生够资格加入我们这个光荣的社团。仅此而已。那我就和他们一起坐下讨论接下来谁能被批准加入。这种事情让我感到很不自在，我自己也不知道为什么—所谓荣誉—从那天起到现在，它都让我很困扰。后来我成了国家科学院院士，最终还是退出了，因为这又是一个类似的组织—绝大多数时间其成员都在挑选谁有足够的名望能加入进来。还有这些讨论，比如：我们搞物理的是否应该团结起来，因为搞化学的那帮人要弄进来一个很棒的化学家，而我们没有那么多空位子，等等问题。我们研究物

理，这跟化学家有什么关系？整个事情都变味了，因为这个机构存在的目的绝大部分是为了决定还有谁能拥有这份荣誉，不是吗？我不喜欢荣誉。

探究世界的游戏规则

［从1950年到1988年，费曼在加州理工学院任理论物理教授。］我们为了理解自然规律所做的事情，有一个好玩的类比，那就是上帝在玩一个巨型游戏。比如说下象棋吧，你不知道这个游戏的规则，但是可以在一旁看棋局，至少是时不时可以看一眼，或许就躲在一个小角落里。你努力从中看出这个游戏的规则，以及棋子的走法。你可能会看出点门道，比如，当棋盘上只有一个象，那么它将永远走在一种颜色的格子上。再后来，你会看出象沿对角线走的规律，这将有助于你理解前面发现的那条规则—象只留在同一种颜色的格子上。这就好比我们理解一个原理的过程，你发现了一条规律，然后又发现了对这个规律的更深层次的理解。如此这般，看似每件事情都在向好的方向发展，你已发现了全部的规则……然而，突然在棋盘的某个角落发生了一些之前你没有见过的奇怪的现象，那你就开始调查原因—原来是王车易位。顺便提一下，在基础物理研究中，我们总是试图去研究那些我们不理解其结论的事物，然后努力去查找原因。在彻底研究之后，我们心里才会释然。

那些不合常理、出乎你意料的事情才是最有意思的。同样地，通过这些不合常理的现象，我们也掀起了物理学革命。就像下象棋，你注意到象停在相同的颜色格子里，沿着对角线走子等，所有这些规则，大家都知道它们是正确的，长期以来也都习以为常。突然有一天你发现有些棋局里象的走法变了，不再只停在一种颜色的格子里。之后你才发现了另一种可能性，在象被吃掉后，卒一路走到对方底线后，那它就成了新的象，这种情况下象就要变色。这种情况是可能发生的，不过之前你并不知道。这跟我们探索自然法则一样，科学家们都认定了一些定律，他们研究研究着，突然发现一些不合常理的现象颠覆了他们的看法，然后我们就得去研究象这个棋子在什么情况下会变色，然后再逐渐掌握这条能解释新现象的新规则。可是，物理研究跟下棋不同：下棋的时候，你会发现规则越变越复杂；而搞物理研究的时候，新发现的规律会越发简洁。从总体上看，它可能变得更复杂，因为我们发现了更多的现象，比如说新的粒子和新物质，因此这些规则再次变得复杂起来。但是，如果你总能意识到这是件有意义的事情，也就是说，我们的认识范围不断扩大，每一次我们都有新的收获，最终把这些认识统一起来，那么我们得

到的理论比以往任何一次都要更简洁。

如果你有兴趣探究物理世界乃至整个世界的本质，在我们这个时代，我们唯一的工具就是数学推理。一个不懂数学的人，他就不能理解—至少不能完全理解—世界上这些特殊的现象、这些自然法则最本质的东西以及事物间的联系。除了数学，我不知道还有什么其他办法可以做到这一点—去准确地描述这个世界……或是去弄清楚世间万物的互相联系。所以，我认为一个没有数学素养的人是无法完全理解这个世界的—请不要误解我的意思，世界上有很多东西是用不到数学的，比如说爱情，它让人愉悦，能给人带来神奇的体验，人们对爱情心驰神往，却又觉得它捉摸不定。我不是说物理学是这个世界的唯一，可是要说到物理学，要从物理学的角度去理解这个世界，那么不懂数学就是一个很大的障碍。

剖析原子

我目前所做的研究工作，属于物理学的一个特殊领域，之前我们讨论过，接下来，我来详细说说我的工作。你们都知道，世间万物都是由原子构成的，我们的研究早就证明了这一点，大多数人也知道这个常识，还有，原子里面有个原子核，电子围着它运动。原子核外电子的运动，我们现在已经完全弄清楚了，至于它的运动规则，用我所说的量子电动力学来解释就很好理解。这个问题解决之后，接下来的问题是：原子核如何运动？核内粒子如何相互作用？它们如何结合在一起？研究这些问题得到的一个副产品，就是发现了核裂变，并利用它制造原子弹。但是，研究把核粒子结合在一起的力，需要很长时间。起初，人们认为这是内部粒子的某种置换。汤川秀树5发现了这些粒子，把它们叫作介子。他推测，如果用质子—质子是原子核里的一种粒子—撞击原子核，介子就会被撞击出来。事实确实如此。

除了能撞击出介子，我们还能撞击出其他粒子，我们差不多把能用的名字都用完了—像k中介子、Σ粒子、Λ粒子等等，现在它们都被称作强子了—随着我们加大撞击的力度，我们找到越来越多不同的粒子，有几百种不同的粒子。接下来的问题—当然，这个时期是指20世纪四五十年代，一直到现在—就是：找出它们的结构模式。这些粒子看起来像是有许许多多有趣的联系和构成模式，直到人们发现了一个理论来解释所有这些模式：所有这些粒子都是由一种叫夸克的粒子构成的—比如，3个夸克就形成1个质子，质子是构成原子核的一种粒子，它和中子一起构成原子核。夸克有许多种—事实上，只需3种夸克就能解释清楚所有这几百种粒子—u-型夸克、d-型夸克和s-型夸克。2个u夸克和1个d夸克构成1个质子，2个d夸克和1个u夸克构成1个中子。如果它们在原子核内部的运动方式发生变化，那就会变成其他种类的粒子。现在的问题是：夸克究竟是怎样运动的？是什么力量把它们吸引在一起的？人们想到一个非常简单的理论，与量子电动力学的理论非常相似—不完全相同，但十分相似—在这个理论中，夸克就像电子，而一种叫胶子的粒子就像穿梭在电子之间的光子，它使“电子”与“电子”之间产生电引力。它们的数学表达式很相似，不过有细微的差别。这些差别是依据极美、极简单的原理推测得来的。虽说这些方程式本身也是基于我们的推测，但是这个

原理绝不是我们妄加猜测的，它的存在是十分确定的。不管存在多少种不同的夸克—这个数字是不确定的，而它们之间作用力的性质是确定的。

按电动力学的理论，两个电子可以被任意分开很远，当分开足够远时，它们之间的作用力就减弱了。而夸克不同。假设电动力学的理论也适用于夸克，那么你用足够大的力量撞击两个物体时，就会撞击出夸克来。但是与之相反，如果你做这么一个实验，期待以高能撞击出夸克来，结果却发现出来一股粒子流—也就是说，所有的粒子都朝着一个方向运动，就像之前的强子一样，根本没有出现夸克。如果要用电动力学的理论来解释，我们只能这么解释：撞击后可能出现了新的夸克，并且它们聚在一起形成了强子。

问题是，为什么电动力学理论内部如此不一致？这些方程式里的细微差别，怎么会造成这么大的差别呢—可以说是完全不同的结果？实际上，对大多数人来说，这是很奇怪的事情：刚开始你可能认为是理论出错了；但越深入研究，你就会发现问题可能就出在这些细微的差别上。现在，我们正处在物理学发展的一个特殊的关键时期。我们已经有了一套关于强子的完整的、确定的理论，我们也做了大量的实验，掌握了丰富的细节，那么我们为什么不能立即检验一下这套理论，看看它到底对不对？因为我们必须要做的事情是计算出这套理论的结果。如果这套理论正确的话，应当发生什么情况，而且事实是否如此？这时我们的困难在第一步。如果理论正确的话，很难计算出将会出现的结果。在目前，推算出这个结果所需的数学手段，我们确实很难去掌握。至少在现在是这样，不是吗？所以很显然，目前我的任务是找出一个方法，从这套理论中找出数学工具，再来检验这套理论，不仅仅是定性，而是真正仔细地检验它能否给出正确的结果。

我花了几年时间研究数学工具，希望它能帮助我解决理论问题，可惜没有成功。然后我发现，要做到这一点，首先我必须弄清楚答案可能是什么样的。这很难解释明白，总之，在我得到一个好的定量工具之前，我首先要有个定性的观念。换句话说，至今人们还不知道（粒子）如何运转的，所以最近一两年我的工作就是努力弄明白它“大致”的运转规律，还没有进入定量研究的阶段。希望将来这种大致的理解能够演变

成一个确切的数学工具或运算法则，来帮助完善粒子理论。你看，我们现在的境况很滑稽：我们不是在探索理论，我们已经有理论了—而且是一个很好的理论，我们正处在用实验来验证理论的阶段，利用实验结果检验理论。我们现在的困境是如何得到实验结果，这也是我的目标。我的愿望就是看看我能不能找到一个方法验证这个理论的正确性（笑）。这是一个很尴尬的境况：你有一套理论，却没法去验证它……我不能忍受这个，我必须解决这个问题。总有一天我会做到的。

我只想做我的物理

研究真正高深的物理问题，你绝对需要大量的时间，这样你才能把模糊的想法拼成完整的理论，那些想法通常转瞬即逝。这这很像搭纸牌房子，每张牌都在晃动，你要是忘了放好其中任何一张牌，整个纸牌屋子就倒塌了。你不知道怎么就出问题了，可是又不得不重新来过；或者你被什么事情中途打断，忘了最初是怎么搭起这些纸牌的——你的纸牌就像就像是你脑子里不同的想法，这些想法合在一起构成一个理论—关键问题是，你用“想法”纸牌搭建城堡，可是这个纸牌城堡很容易倒塌，那就需要集中注意力去做这个事情，也就是说，你需要足够多的时间去思考问题。如果你担任行政职务，就没有那么多时间来做研究工作了。所以我就为自己造了舆论：费曼这个人没有责任心。我告诉每个人我很懒。如果有人请我去一个委员会负责招生什么的，我就说：“我可不行，我一点儿也不关心那些学生。”—当然，我很关心学生。我知道我不干，总有别人会干的，所以我总是说“让乔治干这个吧”，当然这样做不好，人家也不希望你这么做。可是我喜欢物理，想看看自己还能不能接着干下去。所以我很自私，是吧？我只想做我的物理。

最好的教育理念就是没有教育理念

面对一班的学生，你问我怎么教他们最好？我是教他们科学史呢，还是教他们应用物理？我的看法是，最好的教育理念就是没有教育理念，用任何可能的方法去教，不拘一格，好的教学也许场面有点混乱，不过这是我能给出的唯一答案。在教学过程中，你要用不同的办法抓住不同学生的注意力。比如，一个学生对科学史感兴趣，却对数学很头疼；另一个学生刚好相反—喜欢数学却讨厌科学史。如果你想让所有的学生从头到尾都满意，那你最好还是别干了。我真的不知道怎么教书。我不知道怎么回答这个问题，不同的人有不同的兴趣—什么东西会吸引他们，他们对什么感兴趣，怎样引导他们产生兴趣，等等。还有一种强制的方法，那就是你必须通过这门课、你必须参加这个考试。这方法很有效，很多人就是这么受教育的，也许还有更有效的办法。但是，很抱歉，教了这么多年书，尝试了各种不同的教学方法，我还没有真正弄清楚该怎样教好书。

针对不同孩子的教育方式也不相同

小时候，父亲教给我许多东西，激发了我探索这个世界的兴趣。自然而然地，我做父亲后，我也想跟儿子说说世界上有趣的事情。他很小的时候，我们要哄他睡觉，你们懂的，要给他讲故事。我就编了小人儿的故事。这些小人儿有这么高（做手势），他们到处走动，也会出去野餐，他们住在通风机里，他们穿过树林，那里有高大的蓝色树木，那些树没有叶子，只有一个主干，小人儿要在树木之中穿行，诸如此类的解释。我儿子渐渐理解了我说的是小毯子，（家里）蓝色的毯子，没有叶子的树木就是上面蓝色的绒毛……他喜欢这种游戏，因为我会从一个奇特的角度描述这些东西。他喜欢听这些故事，我还编了很多奇妙的历险记—小人儿甚至去过一个潮湿的洞穴，那里风不断地进进出出，进去的是冷风，出来的是热风。其实我讲的是狗的鼻子，我会用这种方式给儿子讲生理学知识。他既然喜欢这些，我就给他讲更多。我也乐在其中，因为我喜欢讲这些，儿子也会去猜我讲的是什么东西，我们乐此不疲。后来我又有了个女儿，我还是这样教她。可我女儿就不买账了，她不愿意听这些故事，她想听书上那些故事，可以一遍遍重复读给她听的故事。她喜欢听我读故事，不喜欢我编故事，她和我儿子不同。所以，如果我说，教孩子科学知识的一个好办法是编个小人儿的故事，可是这在我女儿身上完全行不通—它只是恰巧对我儿子的脾气罢了。

社会科学算不上科学

正因为科学取得了巨大成功，我想啊，就有了伪科学。社会科学就是这样一个例子，它算不上科学。那些人做研究并不科学，徒有形式。比如，他们收集数据，做这种那种分析，但他们得不出任何定律，没能真正发现什么。他们没有取得什么成就—也许有一天他们会，但目前来看还没有什么特别的进展。可是现在的情况是，所谓的“科学”正受到大众追捧。几乎每个问题我们都有专家，听起来好像很权威。其实他们算不上专家，他们只是坐在打字机前鼓捣出一些东西，比如，他们会说有机食品更有益健康，比用化肥的、非有机食品好—这种说法也许有道理，不过至今还没有任何办法来证明。伪科学家们就会坐在打字机前搞出这些东西，好像这就是科学，而他们自己也就成了食品专家、有机食品专家，等等。于是，到处是各种荒诞的说法，各种伪科学大行其道。

也许我错了，也许他们确实懂得那些东西，但我觉得我没错。你知道，我在这方面有经验和优势，我知道真正弄懂一个东西是件很困难的事。你要一丝不苟检查你做的实验，整个实验过程多么容易出错啊，这很容易蒙蔽你的眼睛。我知道弄懂一个东西意味着什么，所以当我了解到他们获取信息的方法，我无法相信他们真的“弄懂”了—他们没有做必要的工作，也没有做必要的检验，他们做研究也不够谨慎。我很怀疑，他们根本不懂，他们只是在吓唬民众。（也许）我不太了解这个世界，但是我确实是这么想的。

质疑和提出问题是我灵魂里最本能的一部分

如果你希望科学能解答所有问题，比如“我们是谁？”“我们要去哪里？”和“宇宙的意义是什么？”等等，那么我觉得，你很容易就会失望并转而向宗教等神秘主义寻求答案。科学家怎么能接受神秘主义的回答呢？我也不知道，因为关键是要了解这个世界—好吧，不说这个。不管怎样，我不懂这些。不过，你想一下，我认为我们所做的就是探索这个世界，我们努力尽可能多地了解这个世界。人们问我：“你在寻找物理学的终极法则吗？”不，不是的，我只是想更多地了解这个世界，如果有那么一条简单的、终极的法则，它可以解释所有的东西，如果它真的存在的话，能发现它真是再好不过了。

打个比方，如果这个法则藏在一个被无数层外皮包裹的洋葱里，光看洋葱皮就让我们头疼了，可我们只能一边流泪一边剥洋葱皮去寻找这个法则。不管这个法则以什么方式出现，它总是在那里。因此当我们去探寻它时，我们不能事先设定它会是什么样的，我们能做的只是增加对它的了解。如果你说这么做的目的是要找到一些深刻的哲学问题的答案，那你就错了。发现了这个世界更多的本质属性，也许不能帮助你回答那个特定的问题，但是，我做研究不是出于这个目的。我对科学有兴趣只是因为我想了解这个世界，我发现越多，探索世界这件事情就越美妙。

很显然，我们人能比动物做更多的事情，可是类似这样的说法存在很多疑问，可是这些正是我要研究的问题，我不知道答案是什么。可我就是不相信人类的这些说法。总的来看，人类对于自己和世界万物的关系的看法过于简单、过于主观，太有局限性。我提醒你，假如上帝的一个化身降临地球，他会觉得这种说法不对头。不管怎么说，在这个问题上争论没有用。我也不是固执己见，我只是想告诉你们，科学看待问题这个习惯影响了我的信仰。还有一点就是，所有的宗教对同一件事各有不同的理论，哪一种说法是正确的呢？你就会开始困惑。一旦你开始怀疑—而你应该怀疑一切—你来问我科学是否可信？我们也不知道什么、哪些是真的，我们要做的是努力找出真相，什么事情都可能是错的。

“什么事情都可能是错的”，你要从这一点开始去理解宗教。好，一旦你这么想，你就开始滑向另一种思考问题的模式，很难回到从前了。从科学的观点来看，或是按我父亲的观点，我们应当弄清楚什么是对的、什么可能是对的，以及什么可能是错的。一旦你开始怀疑—我想，质疑和提出问题是我灵魂里最本能的一部分—当你怀疑并去追问时，你就不会那么轻易去相信任何东西了。

你看，我会存疑，可以忍受这些不确定性，也接受自己很无知。我觉得，不知道答案，这要比得到一个错误的答案有意思得多。对不同的事情，我或是有近乎正确的答案，或是可能相信它，对它们的确信程度不同，但我对任何事都没有绝对的确信，还有好多事情我是一无所知的，诸如“我们为何存在”这样的问题是否有意义，还有这个问题究竟意味着什么等等。我偶尔也会想想这些问题，但是如果我得不出答案，那我就转身去做别的事，我不用非要知道答案不可。不懂一些东西，漫无目的迷失在神秘的宇宙中，这些没有让我感到恐慌。这是很自然的状态，我能说的就这些—我一点儿也不害怕。

2 未来的计算机

长崎原子弹爆炸整整40年后，全程参与了曼哈顿计划的费曼先生在日本做了一次演讲，不过演讲的主题与战争无关—时至今日，这个问题仍然让最聪明的那些人颇费脑筋，那就是计算机的未来，其中包括计算机可能的最小尺寸这一问题—这个问题使费曼看起来像个计算机领域的预言家。本章内容对某些读者而言可能会有难度，但是它在费曼的计算机理论中占据如此重要的地位，所以我希望他们能花点时间读读，即使不得不跳过那些技术相关的部分。本章结尾部分简要探讨了一下费曼钟爱的一个技术问题—它开启了目前的纳米技术革命。

能在纪念仁科芳雄6教授的大会上发表演讲，我感到很高兴，也很荣幸。他是我很敬重和仰慕的一位科学家。到日本来谈计算机，真是有点班门弄斧了。不过最近我都在思考计算机的问题，所以，收到演讲邀请时，我能想到的只有计算机。

我首先声明，今天不打算谈论的内容有哪些。今天演讲的主题是计算机的未来发展趋势，但是未来计算机可能的发展趋势中最重要的那些内容，正是我今天不打算讲的。比如，现在人们投入大量精力去研发更智能的计算机，这种机器的人机交互性能更好，所以这种计算机在输入和输出方面要省事得多，不像现在我们必须编写复杂的程序。人们通常把这称为“人工智能”，但是我不喜欢这个名字。也许非智能计算机比智能计算机工作效率更高。

还有就是编程语言的标准化问题。现在的计算机语言种类太多了，从中选择一种作为标准也许是个好主意。（在日本提出这个问题，我有点犹豫，也许这样做的后果是：又出来一种计算机语言！你们现在已经有四种计算机编程语言了，如果我在这里妄谈什么标准化的问题，很明显，只会导致标准越来越多，而不是变少！）

另外一个有意思的问题，是自动修复程序。这个问题值得研究，但

是我今天不谈这个。修复的意思，是纠正一个程序或机器里的错误，但是当程序和机器变得越来越复杂的时候，修复也就变得异常困难。

另一个发展方向，是制造立体芯片取代平面芯片。这要逐步实现，不可能一步到位。你可以先铺设几层，然后再逐渐增加层数。另一个重要的装置，它可以自动探测芯片上有缺陷的地方，有了它，芯片就能够避开有问题的地方重新连接。现在我们在做大型芯片时，芯片上经常会出现裂缝或损坏的区域，我们只好忍痛把整个芯片扔掉。如果我们能造出这种自动探测装置，那么我们就可以利用芯片上完好无损的区域，这样效率就高多了。我之所以提到这些，是想告诉你们，我很清楚未来计算机发展面临的真正难题。但是，我今天要谈的问题比较简单，就是一些小的技术性问题，按照物理学规律基本能够做到的一些事情。换句话说，我想要讨论的是机器本身，而不是如何使用机器。

我想探讨计算机制造技术方面的一些可能性。我要谈三个问题：一个是并行处理计算机，目前正在研发过程中，不久的将来，或许马上就要面世。第二个问题是计算机的能量消耗问题。这个问题现在看来有瓶颈，解决不了，但事实并非如此。最后，我想谈谈计算机的大小问题。计算机当然越小越好，问题是：在自然规律作用下，我们能制造出来的计算机理论上还能小到什么程度？我不打算探讨哪种技术在未来可能成为现实，这要取决于经济和社会发展的程度，我不想做这种预测。

并行计算机

第一个问题是并行计算机。目前，几乎所有的计算机，传统的计算机，其工作的原理都是冯·诺依曼体系[7]：机器里面有一个很大的存储器，用来储存所有的信息，还有一个中央区域，执行简单的计算。我们从存储器的这个地方提取一个数据，又从存储器的另一个地方提取一个数据，把这两个数据送到中央算术单元进行相加，然后把计算结果传送到存储器的另一个地方。这样来看，计算机有一个高效运转的中央处理器，工作十分卖力，速度也很快。相比之下，整个存储器从头到尾待在一旁，很清闲，就像是一个卡片档案柜，除了偶尔翻找几张卡片，档案柜大多数时间都闲置着。显然，如果有更多的处理器同时工作的话，我们的计算速度就能更快一些。问题是当你使用这个处理器时，可能要用到存储器的某个信息，而同时另一个处理器也需要这个信息，机器就会陷入一片混乱中。出于这些原因，大家普遍认为让很多处理器同时工作是个难题。

人们在这个问题上进行了一些探索，并给大型的传统计算机装上了“向量处理器”。这样一来，当你需要很多不同的部件同时做某一项计算，也许你就可以同时处理它们。人们希望，正常程序能够写成普通的格式，然后一个解释程序可以自动发现使用这种向量功能的合适时机。美国的超级计算机Cray和日本的超级计算机都采用了这种方法。另一种方法是把大量相对简单（但也不是很简单）的计算机用某种形式连起来，这样它们就可以分开对付一个问题的一小部分。事实上，每一台计算机都是独立工作的，但是在需要的时候它们之间可以互相传递信息。这种方案应用在了加州理工学院的“宇宙魔方”这台计算机上—举个例子，这个尝试只是很多可能的方案中的一种。现在，很多人在制造这样的机器。还有一种方法是把大量非常简单的中央处理器分布在整个存储器上，每个中央处理器只与存储器的一小部分打交道，它们之间有一套精巧的连接系统。麻省理工学院研制的线路连接计算机，就是这样一种机器。它有64000个处理器和一个路由系统，其中每16个处理器为一组，每组之间可以相互传递信息，因此总共有4000种可能的路由连接方式。

这样看来，有些科学问题，比如波在某些介质中的传播问题，用并行处理的方法，可能很容易就解决了。这是因为，任何一个特定空间在任何一个时刻的状态，都是可以计算出来的—只要知道相邻空间的压力和应力就可以了。每个空间的压力和应力可以同时计算出来，而这些数值又可以帮助计算出其他所有空间的压力和应力，这就是并行处理设计方案可以解决这类问题的原因。事实已经证明，大量的、各种类型的问题是可以被并行处理的。当一个问题足够大，需要进行大量的计算时，并行运算能够极大地加快解决问题的速度，这个原理不仅仅适用于科学问题。

两年前认为并行程序设计很困难的那种偏见，现在人们看法有变化了吗？事实证明，当时大家认为并行程序设计很困难，甚至几乎是不可能的，是出于这样一种解决思路：选用一个普通程序，然后在这个普通程序的基础上想办法实现高效的并行计算。实际上，在这个问题上，我们必须从头来过：我们要认识到并行运算是有可能的，我们必须对计算机的内部结构有个新的理解，并在此基础上重新编写整个程序。想要高效使用旧的程序，这是不可能的—程序必须重新编写。对于大多数工业应用程序来说，这是一个很不利的因素，目前已经遭遇了相当大的阻力。但是，通常大型程序的开发者是科学家或其他非官方的、才华横溢的程序员，他们热爱计算机科学，如果能提高计算机的工作效率，他们愿意从头开始编写程序。所以，将来的情况可能是这样：首先，这些程序专家用新路子重新编写难度很高、超大型的程序；渐渐地，大家不得不都跟上来，然后越来越多的程序都会用这套新方法来编写；最后，广大程序员也不得不学习如何编写这样的程序了。

减少能量损耗

我想说的第二个问题，是计算机的能量损耗问题。限制巨型计算机发展的一个明显的瓶颈就是它们需要冷却—大量的精力都花在了冷却装置上。我想说明一下，问题就在于工程技术跟不上，但这绝对不是什么大问题。在计算机内部，很小量的一部分信息由一根电线控制—这根电线的电压不是A值就是B值，这叫作“一比特”。我们必须把这根电线的电压从A变到B值，也就是说要充电或者放电。我拿水来打个比方：这就好比我们要往一个容器里注水，使水面升到一个位置（相当于充电）；或者把水放掉，使水面降到另一个位置（相当于放电）。这仅仅是一个类比—如果你更喜欢电学，你可以从电学的角度做更精准的思考。我们现在只是拿水打个比方，为了把容器装满水，我们就把水从高处倒进容器（图1），为了降低水位，我们还可以把容器底部的阀门打开，让水全部流出来。由于水位的突然降低，注水和放水这两个过程中都有能量损耗：在放水时，水从容器顶端的高水位突然降到底部的低水位；同样的道理，你把水倒进去重新把容器装满时也有能量损失。对于电压和电荷来说，情况也是一样的。

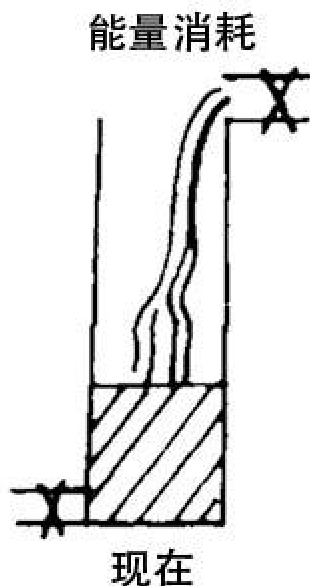


图1

正如班尼特（Bennett）先生解释的那样，这就像开汽车，开动汽车时，你要打火发动引擎，停车时你要踩刹车。每次发动引擎和踩刹车，都会损耗能量。对于汽车来说，现在已经有一种解决能量损耗的办法了，就是把车轮和飞轮连接起来。汽车停下来时，飞轮还在飞转，这样就可以储存能量—之后它还可以和车轮重新连上，让汽车再次开动。在水位调节问题上，我们也可以用一个U形管—在管道底部中间的位置放上一个阀门来连接U形管的两臂（图2）。一开始，阀门关闭，我们在U形管的右臂装满水，让左臂空着。现在，如果我们打开阀门，水就会流向U形管左臂，然后我们把握好时机关上阀门，那样全部的水就会留在U形管左臂里。现在，如果我们想让水再流到U形管右臂，我们就可以再次打开阀门，于是，水就流了回去，然后我们赶紧把阀门关上。当然，这过程中会有一些能量损耗，所以水不可能再爬升到原来的高度，但是我们只需要加一点点水来补充损失的能量就可以了—与图1所示的直接从高处倒水的模式相比，用这种方法能量损失要少得多。这种方法利用的是水的惯性，电学中与之相应的是电感。当然，在芯片上用我们现在使用的硅晶体管制造电感，这很困难。所以就目前的技术水平而言，这个方法不是很切合实际。

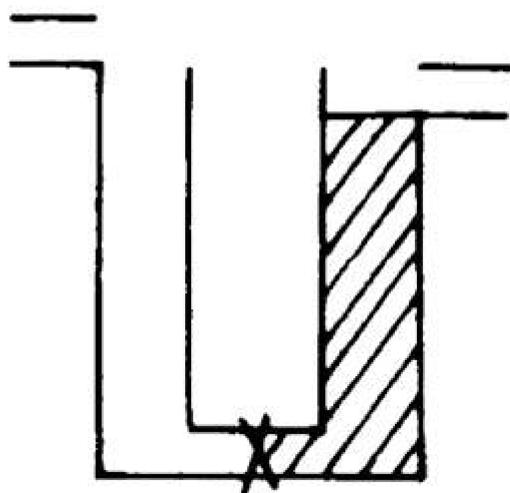


图2

还有一种方法，是使用这样一种装置：注水口的位置仅高于水面一点点，而且随着水位的上升，这个装置也会随之上升（图3），这样，在整个注水过程中，水的落差一直比较小。同样地，我们在距水面下方一点点的地方设置一个出水口，这样放出去的水只限于接近水平面的那一部分水，并且在放水过程中还要（随着水位的下降）不停降低出水口的位置。照这样推理，（电学上）晶体管就不会有热量损失，或者热量损失很小。实际能耗的大小取决于注水时注水装置与水面的距离。这种方法要求灵活改变电压供应，所以，如果我们有一个随时间变化的电压供应，我们就可以采用这种方法。当然，供电过程也会有能量损失，但是电压供应装置是固定在某个地方的，在那里生成一个大的电感是一件很容易的事。人们把这个方法称为“热钟”，因为供压装置是和计时钟同步工作的。另外，跟传统设计不同，它不需要时钟信号为电路计时。

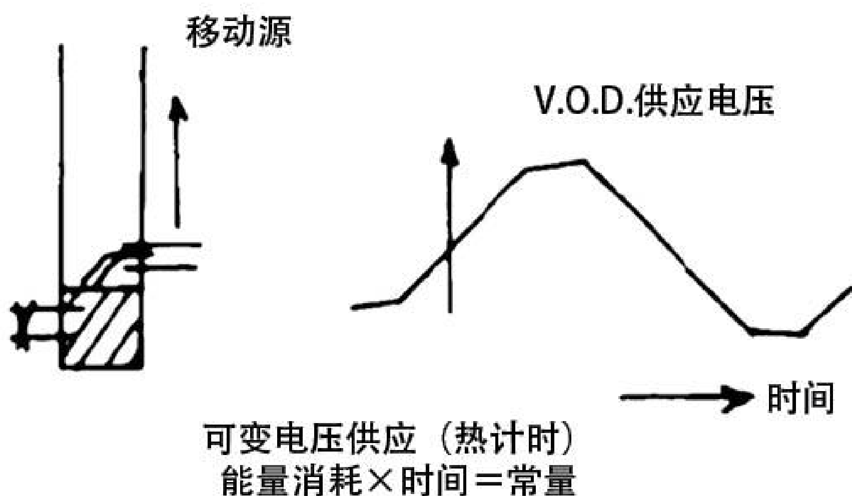


图3

如果水位变化慢的话，后面两种方案需要的能量都会少一些。如果注水太快的话，水位落差就会很大。所以，为了确保这种方案有效运行，我必须放慢注水速度。同样地，在U形管方案中，只有中央阀门开

关的速度比U形管里水流左右流动的速度快一些，这个方案才有可行性。所以我必须让机器慢一些—节约了能耗，但是减慢了机器的速度。其实，能耗和电路启动所需的时间，二者相乘的结果是个常量。尽管如此，事实表明这个方案有很强的可行性，因为用时钟计时得到的时间通常要比晶体管的电路开关时间长得多，我们可以利用这一点来降低能耗。照这样计算，如果实际速度比我们的计算速度慢—比如说慢3倍，那么需要的时间就是原先的3倍，而我们只需要用1/3的能量，所需消耗的功率是原先的1/9。也许这是值得一试的。通过重新设计，也许我们可以使用并行计算或其他方法，花的时间比实现最快的电路速度时间稍微多一点，制造一个既实用又可以进一步减少能耗的更大的机器。

对于晶体管来说，能耗与其启动时间相乘的结果取决于以下几个因素（图4）：

能量×晶体管启动时间

＝**kT**×（长度/热速度）×（长度/平均自由程）×电子数

能量～**109-11 kT**

∴ 缩小尺寸：速度更快

能量消耗更少

图 **4**

1.与温度成比例的热能kT；

2.源漏之间的晶体管的长度除以其中电子的速度（热速度$\sqrt{3kT/m}$）；

3.晶体管长度，以晶体管中电子碰撞的平均自由程为单位；

4.运行时晶体管内部的电子总数。

把相关数值代入公式，计算结果显示，现在使用的晶体管消耗的能量区间是热能kT的10亿倍到100亿倍或更多。在晶体管开启或关闭时，

消耗的能量更大。能量消耗确实很大。减小晶体管的尺寸是个好主意。缩短源漏之间的距离，再减少电子的数目，这样需要用到的能量就少得多了。事实证明，尺寸小一些的晶体管运转的速度快得多，因为电子可以更快地通过晶体管，从而更快地启动或关闭晶体管。无论从哪个方面讲，制造更小的晶体管都是一个很好的思路，大家一直在朝这个目标努力。

但是设想一下这种情况：平均自由程比晶体管还长。这种情况下晶体管就不能正常工作了—它不能按照我们预期的方式工作。这让我想起，多年前曾经有个所谓的声障问题。当时人们认为飞机的速度不可能超过声速，因为如果你按照正常的方法设计飞机，然后把音速代入方程，你就会发现发动机会失灵，机翼不能抬起，整架飞机都不能正常工作。然而，飞机的速度其实是可以突破音速的，问题在于：你要知道什么样的条件下遵循什么样的物理定律，你得依据相应的定律去设计飞机。你不能指望旧的设计会适用于新的环境。可是，新的设计却可能适用于新的环境，我坚信我们完全可以造出小于自由程的晶体管系统—或者，更准确地说，开关系统和计算装置。当然，我只是说“原则上”可以这样做，而不是说去生产这些元件。所以下面我们来讨论，如果我们想制造尽可能小的元件，会是什么样的情况。

缩小尺寸

我要讲的第三个问题就是计算元件的尺寸，而且我是在纯理论层面来讲这个问题。如果一个东西非常小，你担心的第一件事就是布朗运动[8]—所有的粒子都在震颤，没有一个粒子会停留在同一个地方。那样的话，你怎么控制电路呢？再进一步说，就算是这个电路能正常运行了，会不会中间出意外，粒子自己又跳了回去？在我们用2伏电压为这个电路提供能量—这是我们通常的用量（图5）—这个能量相当于室温下热能的80倍（1kT＝1/40伏特）；在这种条件下，粒子跳回去的概率是e^{-80}（e是自然对数的底数）或10^{-43}。这是什么意思呢？这意味着，如果一个计算机内有10亿个晶体管（我们现在还没有这样的计算机），一秒钟内它们的开关转换的总次数为10^{10}次（一次开关转换的时间是百亿分之一秒）；如果它们定时开关，运行10^{9}秒—那相当于30年—那么这个计算机的（晶体管）开关转换的总次数为10^{28}次。而每个晶体管跳回去的概率只有10^{-43}，也就是说30年内都不会出现由热震荡造成的任何错误。如果你还不满意，我们可以用2.5伏的电压供电，这样出错的可能性就更小了。然而，我们也不能排除这种可能性，30年的期限还远远未到，而宇宙射线有可能意外穿过晶体管，导致它发生故障，所以在这方面我们就不用再考虑得太周详了。

布朗运动

2伏特 = 80kT

出错概率**e-80＝10-43**

—

109个晶体管

1010次变化/秒

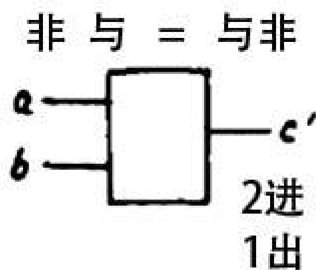
109秒（**30**年）

—

图 5

然而现实中，这种可能性要大得多，我想给你们推荐最近一期《科学美国人》里的一篇文章，那是班尼特和兰道尔合写的《计算的基本物理限制》。我们可以造这样一台计算机，它里面的每一个元件、每一个晶体管可以往前走，然后又意外地逆转，但计算机仍然可以正常运转。计算机的每个操作都可以往前走或往后走，计算的进程往前推进一段时间，然后又往回走取消自己的计算结果—那是“解算”，然后又往前走，周而复始。如果我们能把计算进程往前推一点点，使它往前走的可能性比往后走的可能性稍微大一点点，我们就可以让计算机挺过去，完成整个计算过程。

人们都知道，我们可以完成所有可能的计算，做法是：把一些简单的元件都放在一起—比如晶体管，或者逻辑上更抽象一点的说法，一种叫“NAND门”（与非门）的东西（NAND是“NOT-AND”的组合词）。一个NAND门有两条输入“线”和一条输出“线”（图6）。



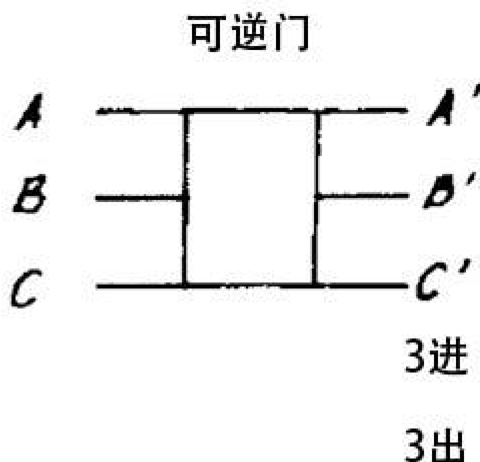
A	B	C′
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

不可逆　　信息丢失

图6

我们先把“NOT”放一边—什么是AND门呢？AND门（与门）是这样一种装置：只有当两个输入值都是1时，它的输出值才是1，其他情况下它的输出值都是0。NOT-AND门正好相反，只要两个输入值不同时为1，输出值都是1（也就是电压值为1），如果两个输入值同时为1，那么输出值为0（也就是电压值为0）。图6显示的就是这样一个NAND门的输入和输出的关系图。A和B是输入，C是输出。如果A和B都是1，则输出为0，否则输出均为1。但是这种装置是不可逆的：信息会丢失。如果我只知道输出结果，我无法知道具体的输入值。我们不能指望这种装置往前进一步又蹦回来，而且还能正确计算。举个例子，如果我们知道输出结果是1，我们也无法判断它的输入是哪一种组合：A＝0、B＝1，还是A＝1、B＝0，或是A＝0、B＝0？而且这个过程它回不去。这样的装置是一个不可逆的门。不过，我们可以用一种不同的基本门比特—也就是一个可逆门—来进行计算，这个伟大的发现是班尼特和弗雷德金（Fredkin）各自独立完成的。我在前面已经用一个被我称作“可逆的

NAND门的比特”解释了他们的想法。它有3个输入和3个输出（图7）。



A′＝ A

B′＝ B

除非 A ＝ 1 而且 B ＝ 1 C′＝ C

如果 A ＝ 1　而且 B ＝ 1 C′＝ 1-C ＝ NOTC

没有信息丢失

需要一些动力推动计算进行下去

能耗×时间＝常量

图 7

输出端的A′和B′和输入端的A和B一一对应，数值相同。但是第三个输入端情况不一样：除了A和B同时都是1的情况之外，C′和C数值保持相同；而在A和B同为1时，不管C是什么，C′都会变化。比如，如果C为1，C′就变为0；如果C为0，C′就变为1—只有在A和B都是1时才会有这种变化。如果你把两个这样的装置连接在一起，通过输入端A和B，如果C经过两个装置数值都不变，那么C′＝C。如果C发生变化，那么在经过

两次变化后，C′数值也和原先的C一样。所以这个装置能够进行自我逆转，信息也不会丢失。这样一来，我们只要知道输出情况，就可以了解输入的情况。

如果所有物体都往前移动，那么一个完全用这种装置制造的机器是可以进行计算的。如果前前后后移动了一阵子，但最终还是往前移动了，这台装置还是可以正常运行的。如果它往后蹦了蹦，后来又往前移动，那它仍旧没有问题。这很像气体里的一个小粒子，身边的原子接连不断地碰撞它，通常情况下这个粒子的运动是毫无目标的，但是假如你稍微拉一下它，给它一个方向，使它有机会朝某个方向运动，这样它就会慢慢向前漂移，从一端到另一端，而不会像之前那样做布朗运动。所以，只要我们提供一点动力把这些粒子拉过那道门槛，我们的计算机就能够工作了。尽管它不是很顺畅地做运算，而是这样来来回回地折腾，但它最终还是完成了运算工作。就像是气体中的粒子，如果我们轻轻地拨动它一下，我们只用了很小的一点能量，可是它要花费很长时间从一端运动到另一端。如果我们着急了，用力去拨它一下，这时我们消耗的能量也就比较多。对计算机来说也是这样。如果我们有耐心，让它慢慢运行，我们就能够让计算机几乎不消耗能耗就能运行，每一步的能耗甚至不到一个kT；如果你有足够多的时间，能量消耗可以降到任意小。但是如果你着急了，那就必须消耗能量，那时候，你为了推动运算继续进行，因而损耗的能量乘以完成这个运算所需要的时间，其计算结果是一个常量。

先记住这些可能性，然后我们再来看看造出来的计算机可以小到什么程度以及数字必须大到什么程度。我们都知道，数字可以用二进制书写，写成一串串的“比特”，每个比特非1即0。另外，一个原子可以代表1或0，这样的一个原子当作一个比特，一小串原子完全可以代表一个数字。（事实上，虽然每个原子有两个以上的状态—我们需要的原子完全可以更少，不过每比特一个原子已经足够小了！）好，来做一个智力游戏，我们考虑一下，是否能够造这样一台计算机—它的书写比特是原子大小的，比如说，在原子自旋中，是否可以这么做：把向上记作1，把向下记作0？还有我们的“晶体管”，在不同地方它的比特也不一样，这就像原子之间的某种相互作用力，它会改变原子的状态。最简单的一个

例子就是：一种3个原子的相互作用模型是否能成为这样一台计算机的基本元素或门。同样地，我们还要注意，如果我们依据适用于常规物体的定律来设计这台机器的话，它是不会正常运转的。我们必须运用新的物理定律—适用于描述原子运动的量子力学定律（图8）。

现在必须使用新的物理定律

可逆门

量子力学

没有更多的限制

除了

不能比原子小

热耗（班尼特）

光速

因此，我们必须接着追问：量子力学的原理是否允许数目如此少的原子的排列—其数目是能让一台计算机完成计算任务的门的数目的几倍？人们已经做过理论上的研究，而且已经发现了这样的原子组合。既然量子力学定律是可逆的，我们就必须用班尼特和弗雷德金发明的可逆逻辑门。而对量子力学的研究表明，除了班尼特先生从热力学角度所说的那些问题，量子力学对它没有其他任何限制。当然，也有一个限制—是个应用方面的限制—也就是，比特必须是1个原子的大小，1个晶体管是3个或4个原子大小。我使用的量子力学的门有3个原子。（我现在不考虑把比特缩小到原子核级别上，我要等技术发展到原子级别之后再向前进一步！）这就要求：（a）大小限制在原子级别；（b）能量需求取决于班尼特计算出来的时间；（c）我没有提到的一个特殊的特点，它与光速有关—我们不可能以快于光的速度发送信号。这些是我所知的计算机的物理学限制。

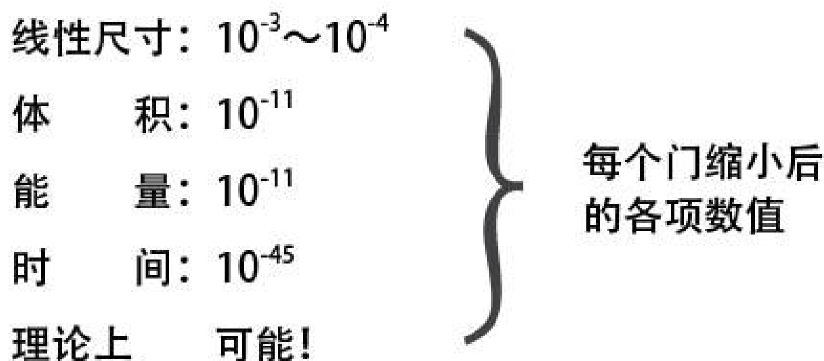


图 9

如果我们设法造一台原子级别的计算机，这将意味着它的尺寸（图9），也就是线性尺寸，比我们现有的极小的芯片还要小1000到10000倍。而这意味着那种计算机的体积只有现在计算机体积的千亿分之一，也就是10-11，因为那种计算机的“晶体管”的体积是我们现在造出来的晶体管的体积的10-11，而且那种“晶体管”开关一次所需的能量，也就是今天的晶体管开关一次所需的能量的10-11，还有，前者每步运算所需的转换时间至少要快1万倍。所以说计算机有很大的发展空间，我把这个奋斗目标留给你们—做计算机硬件研究的人们。我没想惠泽先生翻译我的讲话需要这么长的时间，我要讲的都已经讲完了。谢谢大家！如果你们有什么问题要问，我很乐意回答。

问答环节

问：您提到一个比特的信息可以存储在一个原子里，我想知道的是，您能否把等量的信息存储在一个夸克里？

答：是。但是我们控制不了夸克，所以这个想法确实不可行。你也许认为我刚才讲的那些也不切实际，但是我不这么认为。在我谈到原子时，我相信有一天我们有能力处理和控制单个原子。而夸克的相互作用涉及很高的能量，再加上放射性等原因，所以处理它们是很危险的。但是，我现在说的原子能对我们来说是很熟悉的，我们在化学能和电能里面都接触过它，我认为，原子能的数量级都在现实范围之内，尽管在目前看来还有点怪异。

问：您说计算的元件越小越好。但是我觉得设备必须大一些，因为……

答：你的意思是你的手指太大了，按不了那么小的按钮？是这个意思吗？

问：是的。

答：当然，你是对的。我现在说的是放置在机器人或其他装置内部的计算机。我没有谈到输入和输出的问题，输入的方式或者是看图片、听声音，或者是按按钮。我是在理论的层面上探讨计算过程是怎么完成的，而不是讨论输出应该是哪种形式的。毫无疑问，大多数情况下，输入和输出不能急剧缩小，超出人的操控范围。现在有些计算机上的按钮，对于我们的手指来说已经太难操作了。但是那些复杂的、需要花费很长很长时间的计算，它们能在非常小的机器上很快地完成，而且只消耗很少的能量。我考虑的正是这么一种机器。它们处理的是复杂运算，而不是把两个数字进行相加那种简单的应用。

问：我想知道您如何把信息从一个原子大小的元件传输到另一个原子大小的元件。如果您运用的是两个元件之间量子力学的相互作用力或自然作用力，那么这样一种装置就和“自然”本身十分接近了。比如，如

果我们做一个计算机模拟，一个用来研究临界现象的蒙特卡罗（Monte Carlo）磁体模拟，那么您的原子级计算机就需要和磁体本身很接近。您怎么看待这个问题？

答：是的。我们做的东西都是“自然”的。出于某种目的，我们用某种方式安排它，我们为了这个目的进行运算。按照这个思路，如果你愿意，在磁体内部也有某种联系，那里也正在进行某些形式的运算，就像太阳系里的情况一样。但是，也许那不是我们现在想要做的运算。我们想要做的这种装置，它里面的计算程序可以随着我们想要解决的问题改变，而不是计算自身的磁体问题—那是它自己要解决的问题。除非碰巧某人给我的问题是研究行星的运动，否则我不可能把太阳系当作一台计算机看待。在那种情形下，我能做的只是观察而已。以前有一篇有趣的文章，曾经被人当作笑话。这篇“文章”展望了在遥远的未来开展空气动力学运算的一种新方法：不需要用当时那种复杂的计算机，作者发明了一种简单的装置—鼓动空气吹过机翼。（他重新发明了风洞！）

问：我最近在报纸上读到一篇文章，说大脑里神经系统的运转速度比目前的计算机慢得多，而神经系统中的单元却（比计算机的元件）小得多。您觉得您今天谈的计算机和大脑神经系统是不是有些相同？

答：大脑和计算机有一点类似，那就是它们内部有些单元显然可以在其他单元的控制下进行转换。神经冲动控制或刺激其他神经，具体方式取决于是否有超过一个的刺激进入大脑—有点像AND或这一类的东西。这样一次传输，大脑细胞需要消耗多少能量？我不知道这个数据。可是，大脑完成一次转换所需的时间，即使和今天的计算机相比，也要长得多，更不用说将来更奇妙的原子计算机。但是大脑的内部连接系统远比计算机复杂，它的每个神经元连接着数千个神经元，而我们的一个晶体管只连接两个或三个晶体管。

有人关注活动中大脑的活跃程度，他们看到，在许多方面，大脑性能超过今天的计算机，而在其他很多方面，计算机又超过我们。这激励人们去设计能做更多事情的计算机。一般情况是，工程师对大脑如何工作有了一个认识（他自己的观点），然后他就设计一个也有这种功能的机器。这种新机器也许真的做得很好，但是我要提醒你们，它并不能告

诉我们大脑到底是怎么工作的，也不意味着为了制造功能很强大的计算机，我们就必须真的要了解大脑如何工作。这就好比说，我们制造飞行器，并不一定要先知道鸟如何拍翅膀、羽毛的结构如何有利于飞行；我们要制造速度很快的汽车，也不一定非要模仿印度豹的腿的杠杆系统不可—印度豹跑得很快。因此，要设计出在很多方面超过自然力量的装置，我们也不是一定要在细节上模仿自然的行为模式。这是一个有趣的话题，我很乐意展开来谈谈。

和计算机相比，你的大脑非常脆弱。我给你一串数字：1、3、7……或者更难一些，ichi、san、shichi、san、ni、go、ni、go、ichi、hachi、ichi、ku、san、go。现在我要你重复一遍。（你做不到！）然而计算机能够记住几万个数字，并且能够一一背出来，还能把它们加起来，或者用它们做很多我们做不到的事情。另一方面，如果让我看一张人脸，只要看一眼我就能告诉你他是谁—如果我认识这个人的话，或者我会告诉你我不认识这个人。但是我们现在还不知道怎么设计这样一个计算机系统：我们给它看一张人脸的图片，它就能够把这些信息告诉我们。（它做不到这点，）尽管它已经看过很多人脸，而且我们也教过它（怎么去识别人脸）。

另外一个有趣的例子，是能下国际象棋的机器。我们能够造出这样一台机器，它几乎比在座的所有人下象棋下得都好，这真的很神奇。但是，它们是衡量比较了很多种可能性才做到这一点的。如果它走到这里，那么我可以走这儿，然后它再走到那里，人机对局就这样继续下去。每走一步，它们都会仔细考虑每一种可能的下法，然后选择最佳的落子点。计算机的程序储存了上百万种可能的走法，而一个国际象棋大师，作为一个人，他应对的方式就不一样—他辨识的是图形。在决定每一步怎么走之前，他只能比较30到40个可以落子的地方。因此，虽然围棋的规则简单，可是下围棋的计算机表现不是很好，因为每走一步都有太多的可能性、有太多的事情需要再三考虑，而机器显然不具备这种思考能力。所以，如何让计算机辨识图形以及在这种情况下应该如何应对，这些问题对于计算机工程师（他们喜欢自称计算机科学家）来说，仍然是一件非常困难的事。对于研发未来的计算机来说，这当然是一件重要的事情，也许比我说到的其他事情还重要。造一个能够把围棋下得

更好的机器吧！9

问：我觉得，任何一种计算方法—除非它能提供一种编写程序的方法，否则不会有太大的用处。我曾经认为弗雷德金关于保守逻辑的论文很有启发性，但是当我想要用这种方法写一个简单程序时，我就傻眼了，因为设计这样一套程序要比利用它写出来的程序复杂很多。我想，我们可能很容易就进入一种无穷倒退的境地，因为设计一套特定程序的过程，会比根据它写出的程序本身复杂，而如果想要让设计过程自动化，这自动化程序将会更为复杂，特别是这种情况：这个程序是硬连线的，而不是像软件那样是可以分离的。

答：我们在这个问题上的体验不同。没有什么无穷倒退性：复杂性到了一定程度就会停止下来。弗雷德金归根到底要谈论的机器和我刚才谈到的量子计算机都是通用的计算机，因为它们都可以在我们编写的程序指挥下去做各种各样的工作。这不是一个硬连线程序。就程序的固定不变性而言，它们和那些可以把信息输进去的普通计算机也没有太大的不同—这个程序也是信息输入的一部分—然后机器就执行你给的任务。它是硬连线的，但是它和普通的计算机一样，也是通用的计算机。这些事情还很不确定，但是我发现了一个运算法则。如果一个不可逆的机器装了一个普通程序，那么我可以利用一个直接翻译的工具把它转变成一个可逆机器的程序，不过翻译转换的效率很低，而且还需要更多的步骤。然而，在实际操作中，步骤可以少得多。不过至少我知道，我可以把不可逆机器上的一个2n步骤的程序，转变为应用于可逆机器上的一个3n步骤的程序。步骤确实是增加了不少。因为我没有试图去找实现这种转变的最少步骤，所以我完成这种转变的效率很低—这只是完成这个转变的一种方法而已。我真的认为，我们不会遇到你说的那种倒退，但是也许你是对的，我不能确定。

问：那些可逆机器运行这么慢，我们是不是会牺牲掉我们原本希望这种装置拥有的很多优点？对这一点我非常悲观。

答：它们运行会慢一些，但是它们的尺寸要小得多。除非需要，一般情况下我不让它变成可逆的。因为能耗仅仅在80kT的情况下，不可逆机器就已经工作得很完美了，所以没有必要让机器变得可逆，除非你努

力大幅度降低能耗—其实是多此一举了。与目前的109kT或1010kT相比，80kT要小得多，所以在能量方面我至少还有107的改进空间，所以我用不可逆的机器还是没有问题的！这是真的。目前来讲，这是一个正确的发展方向。我只是跟自己玩个智力游戏，才会去探究在理论上我们还可以走多远—而不是付诸实践，结果我发现能量消耗最小可以达到一个kT能量的几分之一，我还可以把机器造得极小—原子级别的微型机器。但是，要做到这一点，我必须运用可逆物理定律。之所以会出现不可逆性，是因为热量扩散到了大量原子，不能再聚拢过来。要把机器做得非常小，除非要用到由很多原子组成的冷却元件，否则我不得不把它做成可逆的机器。在现实中，也许永远不会有那么一天，我们会很不情愿地把一台小计算机跟一个有1010个原子的大铅片连在一起（这个尺寸实际上还是很小），让它变得根本不可逆。因此，我同意你的看法，在实践中，很长时期内—也许是永远，我们都将使用不可逆门。但是另一方面，力图在各方面都找到极限状态，让人类的想象力尽可能在每个领域都发挥得淋漓尽致，这是科学探险的一个部分。尽管这种努力在每个发展阶段看似荒唐而且无用，但是结果常常证明，至少它是有用的。

问：不确定原理对它有限制吗？在你的可逆机器方案里，对能量和时间有没有一些基本的限制？

答：那正是我要说的。这里不存在量子力学对它的进一步限制。你一定要仔细区分以下两种能量：一是丢失的能量或者说是消耗的、不可逆的能量，那是机器在工作过程中产生的热量，二是包含在运动部件中、可以被再次吸取的能量。时间和可以被再次吸取的能量之间有某种关系。但是那种可以被再次吸取的能量无关紧要，或者说我们不必关注它，这好比问我们要不要加上静止能量，即装置中所有原子的mc2。我只说到消耗的能量乘以时间，这里没有什么限制。不过，如果你想用超高速进行运算的话，你就得给机器配备移动快而且有能量的部件，这是肯定的。但是这些能量不是在运算的每一个步骤都会有损失，它可以靠惯性运行下去。

【无提问】

费曼：关于“没有用”这个问题，请允许我说几句，我想再补充一

点。我一直在等你们问我这个问题，但你们没有问，所以我就主动来说说这个问题。我们怎样去造这么小的一个机器，小到我们要把原子放在某些特殊的位置上？虽然我们现在还没有这样的机器—它的可移动的部件小得出奇，只有几个到几百个原子的大小，但是机器制造朝这个方向发展，这也没有什么物理限制。今天我们已经开始使用硅了，我们也没有理由不把它们做成一个个独立的小部件，方便它们活动。我们还可以装上小喷嘴，在特定的区域喷上不同的化学品。我们能制造超级小的机器，这些机器很容易用我们造的这些计算机的电路来控制。最后，还是为了好玩，开动脑筋聊以自娱，我们可以想象机器只有几个微米大，所有的轮子和线路都通过电路和硅连接。于是这整个东西是一个大元件，它运行起来不像我们现在这些机器那么笨拙、生硬，而像天鹅转动脖子那样优雅灵活—归根到底，天鹅脖子也像是由很多小机器构成，是由一些细胞交织在一起，被一些指令有条不紊地控制着。我们为什么不能做到这个程度呢？

3　从加入“曼哈顿计划”到亲眼看到原子弹爆炸

这里是一些轻松的小故事—妙语连珠的费曼在洛斯阿拉莫斯是开保险柜的能手，还不断惹麻烦：他违反“男子宿舍谢绝女客入内”的规定，从而赢得了私人空间；智斗营地审查官员；与科学大腕奥本海默、玻尔和贝特等人成了忘年交；他卓尔不群，是唯一不戴护目镜直视第一颗原子弹爆炸的人，而这一经历永远地改变了费曼。

赫希菲尔德（Hirschfelder）教授真是过誉了，他对我的溢美之词和我要讲的情况有点出入。我演讲的题目是《洛斯阿拉莫斯：从基层做起》。我说“从基层做起”，是指虽然我目前在这个领域小有名气，但在那时候我还只是个无名小辈。我刚开始接触曼哈顿计划10，参与到相关的研究工作时，我连博士学位还没有拿到。跟你们说起洛斯阿拉莫斯的那些人，他们大多认识政府机构或其他机构的一些高层人员，他们是决策层的人。我不参与任何重大决策，我就是基层的一个工作人员。当然，我也不是总在最基层工作，大家也知道，后来我往上升了几级，但是我不属于高层。所以我希望你们不要像赫希菲尔德教授介绍的那样看待我，你只要想着，这个年轻人还没有拿到博士学位，当时他还在写博士论文。我从自己如何加入曼哈顿计划说起，说说这个过程发生了哪些事情。这就是我要讲的内容—我在那个项目中做了哪些工作。

有一天，我正在自己的办公室（普林斯顿大学）工作，鲍勃·威尔逊11走了进来。当时，我正在工作—（听众笑）你们怎么啦？除了正儿八经地工作，我确实还研究很多更有趣的事情。你们到底笑什么呢？—鲍勃·威尔逊进来说，有资金支持他做一项秘密的研究工作。他还说，本来他不应该告诉任何人，但他要告诉我，因为他知道，一旦我知道他要做的事情是什么，我肯定会加入进来。所以他告诉我，他们要做的是铀同位素分离，最终目的是制造一个炸弹，然而用目前的方法分离出来的铀同位素与最终所需的铀同位素不一样，所以他想改进铀同位素分离的技

术。他把这些都告诉了我，接着又说下午有个会议……我说我不想掺和这事。他说："你不要急着做决定，3点钟有个会，我们到时见。"我说："你放心，你告诉我这个秘密，我不会告诉别人，但是我不会参与进来。"说完我就转身写我自己的论文。大概也就3分钟吧，我又站起身，开始在屋里踱起步来，琢磨鲍勃说的事情。德国有个希特勒，他们很有可能也在研究原子弹，他们要是在我们之前制造出原子弹，这就太可怕了。所以我决定去参加3点钟的会议。到4点钟的时候，我已经在一个办公室里有了张桌子，并开始演算这种铀同位素分离方法是否受限于离子束的电荷总量这类问题。我不打算介绍那些细节。总之，我有一张桌子，有一沓草稿纸，我尽我所能努力高效工作。负责仪器设备制造的同事们打算就在那里做实验。那场景就像我们看动画片似的，咔、咔、咔，一套设备从无到有，一下子就被组装起来了，我每次抬头，都能看到设备在一点点变大。那时候，所有的小伙子都决定停下手头的科研项目，投身到这个项目中。战争期间，所有的科学研究工作都中止了，除了在洛斯阿拉莫斯的这一点点科研工作。而在洛斯阿拉莫斯，科研工作并没有占多大分量，大量工作都是工程方面的。大家搬来自己原先研究项目中的设备，形形色色的设备汇聚在一起，用来组装一个用于铀同位素分离的新装置。我也中断了自己的研究。不过，不久之后，我请了六个星期的假，写完了博士论文。所以，去洛斯阿拉莫斯前，我刚刚拿到了博士学位，也就是说，我并不完全像我一开始说的那样无足轻重。

当时在普林斯顿进行的这个项目，它最初给我的很有趣的经历就是能结识科学界的大人物，在这之前我还没有接触过多少大科学家。那里有个评审委员会，由他们来决定我们该采用哪一种方案分离铀元素，并给我们提供帮助，他们会帮助我们最终决定用哪一种方法。这个委员会的成员有托尔曼（Tolman）、史密斯（Smyth）、尤里（Urey）、拉比（Rabi）和奥本海默等人，还有康普顿（Compton）。有一件事让我很震惊。他们开会时，我也获准参加，因为我了解正在开展的工作的原理，他们开会时会问我一些问题，然后我们会就那问题展开讨论。接着，某个人会提出一个观点，比如说康普顿，他就会提出一个不同的观点—他的观点往往很正确，确实是正确的想法，他坚持说就应该"这样做"。而另外一个人会说，也许我们要考虑另一种可能性—这与康普顿的观点刚好相反—我们得考虑这种相反的可能性。我都快跳起来了！他，

康普顿，他应该站出来反驳的，他应该重申一下他的观点！你看，每个人的看法都不一样，大家围着桌子辩论。最后，委员会主席托尔曼开口了："好了，我听了大家的发言，我认为康普顿的意见是最好的。现在，我们要讨论下一个问题了。"那情景太让我震惊了，委员会的人能提出那么多不同的观点，每个人都能从一个新的角度去看待问题，每个人都记得别人说了些什么，用心倾听别人的想法，最后归纳总结，选出最好的想法—没有必要一再申明自己的看法，大家都是再聪明不过的人，真正是高手过招，你明白吗？这太让人震撼了，他们确实非常了不起！

最终的决定下来了，这个项目的目的不仅仅是分离铀。我们接到通知，停止在普林斯顿的工作，全部人马开拔到新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯，也就是说，这个项目真的要制造原子弹了，我们都要到那里去造原子弹了。我们要做一些实验，还需要做一些理论方面的工作。我做的是理论论证的工作，其他人去做实验。接下来的问题是：做什么？我们奉命暂停这边的工作，但是洛斯阿拉莫斯那里还没有准备好，所以中间出现了一段空当时间。鲍勃想利用这段时间派我去一趟芝加哥，尽可能去了解我们要制造的那颗原子弹及其相关问题，以便我们在自己的实验室里动手安装所需的设备，还有各种各样的仪器，等等，这样等我们一到洛斯阿拉莫斯，这些东西就会派上用场，我们可以马上开工，一点儿时间也不会浪费。我在芝加哥的任务就是拜访每个小组，告诉他们我是他们的同事，如果他们遇到问题，要尽可能详细地告诉我，这样我才能够坐下来研究如何解决这个问题。问题解决后，我就去找别人，帮他们解决另一个问题。通过这种方法，我可以透彻地了解所有的细节问题。这确实是个很好的主意，虽然我心里有点过不去。有一次，一个人告诉我他遇到的一个问题，我灵机一动，对他说（我也很幸运），你为什么不用那种方法呢？照我的建议，半小时后，他就把问题解决了—之前他们已经被这个问题困扰了3个月！所以，你看，我确实也是做了点工作。从芝加哥回来后，我给同事们上课：有多少能量会被释放出来？这颗原子弹会是什么样的？等等。我记得我的一位朋友，也是我的同事，数学家保罗·奥卢姆（Paul Olum），在我讲完后，他走过来对我说："如果将来他们把这件事拍成电影，他们会安排一个情节，让这个从芝加哥回来的人，西装革履，夹着公文包，向普林斯顿的人介绍原子弹的一切情况—可实际上你是穿着脏兮兮的短袖衬衫来做报告的。"无论如何，这是件

十分严肃的事，保罗饶有兴趣地琢磨现实与这事被拍成电影后里面的情节之间的差距。

看起来大家还要再等些时候才能动身，于是威尔逊就亲自去了一趟洛斯阿拉莫斯，他想看看那里进展如何了，到底是什么地方出问题了。他到那儿一看，建筑公司的人正在卖力地工作，他们已经建好了一个剧院，还有其他几个建筑，因为他们知道怎么做。但是没有人清楚地指示他们该怎样去建一个实验室—要装多少煤气管子，多少水管—于是他就到施工现场，当场决定该装多少煤气管子和水管，等等，并要求他们开始动工建实验室。然后他又回到普林斯顿—我们都整装待发了—而奥本海默和格罗夫斯（Groves）在一些问题上有分歧，我们越来越不耐烦了。基于我的研究的进展情况，威尔逊打电话给芝加哥的曼利（Manley），他们一致决定，即使洛斯阿拉莫斯没准备好，无论如何，我们都应该去那儿了。就这样，我们在洛斯阿拉莫斯实验室还没有完全建成的情况下就出发了。顺便说一句，招我们进这个项目的，是奥本海默，还有其他一些人，他对每个人都很有耐心，也很关照每一个人。他很担心我妻子的病情，她有肺结核，他问起那里是否有医院和其他一些设施。这是我第一次和他讨论这种私人问题，他真是一个很好的人。他们还提醒我们要留心一些细节问题，比如，不要在普林斯顿买火车票，因为普林斯顿是个很小的站，如果大家都买了去新墨西哥州阿布圭基的票，别人就会怀疑出什么大事了。最后，大家选择从别的车站上车去阿布圭基，只有我在普林斯顿买了票，因为我想，既然其他人都不在普林斯顿买票……当我去火车站买票，说我要去新墨西哥州的阿布圭基时，售票员说："噢，原来那些东西全是给你托运的呀。"此前我们已经花了好几个星期的时间托运那些装满仪器的柳条箱，原来还希望他们不会注意到这些全是发往阿布圭基的。现在至少有了一个合理的理由了，我们托运那么多柳条箱到阿布圭基，那是我要动身去那个地方了。

我们还是去得早了点。我们到了那里，宿舍什么的还没有准备好。实际上，实验室也没有完全建好。我们提前到来，是催着他们赶紧完工。这下真是把他们逼疯了，为了安置我们，他们把附近农场的房子全部租了下来。我们起先住在农场低矮的平房里，早上开车去上班。开车上班的第一个早晨，我记得很清楚，那里美丽的景色，对一个东部来

的、又不怎么旅行的人来说，真是太震撼了。那些壮观的悬崖绝壁，你可能在图片上都看到过，我就不细说了。那些平顶的陡峭的山体，你从下面爬上去看的话，这些奇崛的峭壁让我们都惊呆了。我印象最深的一件事是，在汽车盘旋开上山的时候，我说，现在这里说不定还住着印第安人呢！开车的那个人还真就停了下来……他下了车，绕着一个角落走了一圈，真的发现了印第安人住过的洞穴，而且可以进去看看。所以，从这一点来说，那段经历真的让人非常兴奋。

我第一次到基地时，在大门口看到—你知道，军事科研单位都应该有个围墙围着，但是那里还在施工，所以四周还是空旷一片。另外，照计划，那里要建一个镇子，外头再围上一圈围墙—在大门口，我看见了我的朋友保罗·奥卢姆，他也是我的助手，他正站在那里，手里拿着记事板，检查进进出出的卡车，指挥他们把材料运送到不同的地方。我走进实验室的话，应该会见到一些圈里的人，以前我只在《物理评论》上读过他们的论文，但从未见过面。他们会介绍说："这位是约翰·威廉斯。"只见一个人从铺满设计图的办公桌后站起身，袖子挽得老高，他站在窗边，指挥着卡车往不同的方向运送建筑材料。也就是说，我们现在要接手建筑公司的活儿，接着完成基地的建设。一开始的时候，物理学家们，尤其是实验物理学家，在他们的实验大楼和设备还没有准备就绪之前，他们无事可做，所以他们就去盖房子，或是帮着盖房子。理论物理学家就不同了，他们不用待在农舍里，可以直接住在基地里，因为他们马上可以开始工作。所以我们立即投入到工作中。当然，这意味着我们每个人都有一块移动黑板，那种有轮子的、可以推来推去的黑板。于是，我们推着黑板走来走去—塞伯尔（Seber）会给我们讲解他们在伯克利大学期间对原子弹、核物理和其他这类东西的思考和研究。我不大懂这些东西，我之前做的是不同的工作。所以我有太多太多的事情要做，每天我都要学习、阅读、再学习、再阅读，那真是一段极其忙碌也很充实的日子。我的运气还是不错。那段时间，除了汉斯·贝特，由于一些突发事件，其他大人物几乎同时离开了洛斯阿拉莫斯，比如魏斯科普夫（Weisskopf）不得不回麻省理工学院处理一些事情，特勒（Teller）那时也不在。而在那段时间，贝特需要有个人和他探讨问题，用不同的意见帮助他完善自己的想法。他来到一间办公室里，找到那个桀骜不驯的年轻人，他开始阐述他的想法。我说："不对，不对，你疯了。应该是这

样子的。”他说：“等一下……”他接着会解释他的想法没错，错的是我。我们就这么争辩下去。结果是—你们知道，一说起物理问题，我眼里只有物理，根本忘了眼前跟我辩论的人是谁，我会说一些不中听的话，比如：不，不，你错了，你真是疯了—可事实证明，这样的辩论正是他需要的，我非但没有得罪他，我还因此被提拔了几级，最后我成了贝特手下一个小组的头儿，有四个手下。

跟着贝特工作，这期间有很多有趣的事情。他来的第一天，我们正好配了一个加法器，那种手动的Merchant牌计算器。他说，“让我们来看看，算算压强”—他刚刚研究出一条公式，里头有压强的平方—“压强48，48的平方是……”我伸手去拿那个机器，还没动手输入数字，他已经开口了，说计算结果大约是2300。于是，我开始用计算器来计算，他紧接着说：“你想知道准确的数目？是2304。”计算器的结果确实是2304。我问他是怎么算出来的，他说：“你不知道怎么算50上下的数字的平方吗？假如一个数字挨着50，比如说比50小3的数是47，而比25小3的数是22，那么47的平方，前两位数就是22，后两位数就是两个数的相差的平方—比方说，对于比50小3的数47，两数相差3，3的平方是9，那么47的平方就是2209。很妙，是吧？”我们继续工作（他数学确实很好），过了一会儿，我们又要计算$2\frac{1}{2}$的立方根。我们有个求立方根的小图表，上面有一些近似数，可以在计算器公司提供给我们的计算器上进行试验。于是（你知道，求立方根他要多用点时间），我打开抽屉，拿出立方根表……贝特又开口报了个数：“1.35。”我还以为结果会是一个接近$2\frac{1}{2}$的数字，但是实际上不是。我很好奇：“你怎么算出来的？”他说：“噢，你知道2.5的对数是XX；你把它除以3，得到XX的立方根。那么，1.3的对数是这个，1.4的对数是XX，我就在它们中间取值。”我根本不知道把这些数除以3，更不用说……所以你们看，他精通所有这些算法，他特别拿手，这对我来说是一个挑战。我坚持练习这些计算。我们时常比赛谁算得更快。每次比赛的时候，我们各自飞快地算啊算，有时候我也能赢他。几年之后，我基本能每4次赢1次了。当然，你会注意数字中的一些乐趣，比如174乘以140。你注意到，173乘以141，接近3的平方根乘以2的平方根，这是6的平方根，就是245。平时，你要注意数字，不过每个人注意数字的方式是不同的—我们从中得到了许多乐

趣。$2\frac{1}{2}$

我说过，刚到那里时我们没有宿舍，但是理论物理学家得就地开始工作。给我们安排的第一个住处是一个旧的校舍，以前这里是个男子学校。我住的第一个地方是“机械系宿舍”，里面塞满了上下铺。宿舍安排得不是很好，鲍勃·克里斯蒂（Bob Christie）和他的妻子每天早晨都要经过我们的房间去浴室，很不方便。

我们的第二个住处，是一个叫“大屋子”的建筑，二层楼的建筑外围整个都是大露台，所有的床都沿着墙摆在那里，一张床紧挨着另一张床。一楼贴着一张大表格，上面标着你的床号，以及你该用哪个浴室换衣服。我的名字下写着“浴室C”，但是没有床号！这让我相当恼火。最后，宿舍终于建好了，我去找他们，看看自己被分配到了哪个房间。他们说：“现在你还可以挑房间。”我很是费了一番脑筋，你们猜猜我是怎么选房间的—我先看好哪儿是女员工宿舍，然后选了一个能看到那里的房间。后来我才发现，我房间的正前方正好被一棵大树挡着。自己选的房间，还能怎么说呢？他们告诉我，现在只能两个人住一间—不过这是暂时的，还有，每两个房间合用一个浴室。房间里摆的是上下铺，我可不喜欢两个人挤在一个屋子里。我搬进来的那个晚上，房间里还没有其他人住进来。那时，我的妻子因肺病留在阿布圭基治疗，她的几箱行李放在我这儿。我打开其中一个箱子，拿出一件她的小睡衣，随手扔到上铺，还把上铺弄成有人睡的样子。我又拿出她的拖鞋，还在浴室的地面上撒了些化妆粉。我想让别人觉得，这间屋子除了我还住进来了一个女人。不是吗？如果两张床都有人了，就不会再有人想住进来了。是吧？你看结果会是怎样？这里可是男员工宿舍！第二天晚上，我回来后发现，我的睡衣被清洁工细心地叠好，并放在枕头下面，拖鞋还被她们整齐地摆到床底下。那件女式睡衣也叠好了，放在上铺的枕头下；上铺也收拾得整整齐齐，她的拖鞋也被整齐地摆在下铺的床底下；撒了化妆粉的浴室地面也被打扫得干干净净。最重要的一点是，没有人搬进来，这屋还是我一个人住着。到第二天夜里，还是这样。那是因为我故技重施了：早上醒来后，我把上铺弄乱，把女式睡衣扔上去，再把化妆粉撒到浴室里，等等。这种小把戏持续了四个晚上，最终我一个人拥有了这间屋子。因为每个人都安置下来了，他们就不会再塞一个人到我的房间里

了。每个晚上回来，我屋里的东西都收拾得整整齐齐，包括女式睡衣什么的，虽说这是个男员工宿舍。嗯，在那种情况下，我就是那么干的。

在那里，我还有点儿卷进了政治事务，那儿有个叫“小镇委员会”的机构。很显然，这个小镇该如何管理之类的事，必须军方说了算，而当地要成立一个管理委员会协助管理。我对那个管委会一无所知，但是像所有的政治机构一样，在那个管委会里也有很多激动人心的事。特别是这里有许多团体的代表：代表家庭妇女的，代表机械工人的，代表技术人员的，等等。至于单身汉和独身的女人，这些住在员工宿舍里的人，觉得他们也要有个代表在管委会里替他们说话，因为刚刚颁布了一些新规，比如“女人不准进入男人宿舍”。这也太荒唐了，大家都是成年人了嘛（哈哈），怎么会有这么愚蠢的规定？所以我们不得不行动起来。我们做了决定，我们展开大讨论，你们知道是怎么回事。后来，我被大家推选为代表，进入了小镇管委会。

在我进入小镇管委会一年，呃，一年半以后，我和贝特谈了这些事。他一直担任管委会的高层官员。我把那件事告诉了他，也就是我把妻子的衣物放在上铺的小把戏。他一听就大笑起来：“哈，就是这件事把你带进小镇管委会去了。”那时，有人向上头递交了一个报告，十分严肃的报告。当时，那个可怜的女人吓得发抖，她负责打扫宿舍房间，一开门就发现问题严重—有人来这里和男人睡觉！她站在那里颤抖着，不知如何是好。她往上汇报，清洁工向她的头头汇报，清洁工头头向中尉汇报，中尉再向少校汇报，就这样一路汇报上去，最后报告了将军，一直到管委会—那么，他们是怎么应对的呢？—他们说：“要研究研究！”与此同时，一道指令从上往下传达，从上校传到少校，再到中尉，再到清洁工的头头，直到那个女清洁工—“把东西放到原处，把它们整理好”，再继续观察。嗯？第二天，她又向上汇报，同样的事情，如此这般又重演了一遍……那四天，他们为这事伤透了脑筋：他们到底该怎么办呢？最后他们颁布了一个纪律：“女人不准进入男人宿舍！”这条禁令引起下面一片抗议，最后，他们不得不参与所有这些“政治”活动，选出一个人来代表他们……

接下来我要向你们说说那个时候的审查制度。他们出台的一个决定是完全非法的，那就是审查美国国内，呃，美国大陆的信件，其实，他

们无权这么做。因此他们在制定这个审查制度时非常小心翼翼，弄得大家好像自愿接受这些审查似的。我们寄信时会自愿不封好信封，我们同意他们拆看我们的来信，没关系，我们都是自愿的。我们往外发的信，都不会封口，经过他们检查后，如果没问题的话，他们会替我们封上信封。如果他们认为信的内容有问题—按照他们的标准，他们就会把信退回来，附上一个纸条，上面写着：按照我们的“理解”，信上某一段违规了，诸如此类的话。他们行事异常谨慎，让这些崇尚自由的科学家最终同意接受这个条件，信件审查制度终于建立起来了。当然，还有一些制度保障我们的权益，比如，如果我们愿意，我们有权评论这里的管理者，我们可以写信给参议员，坦言我们不喜欢某些管理方式或是某某事情。就这样，审查制度完全建立起来了，他们保证，如果遇到什么困难，他们会通知我们的。

这样的日子开始了。执行审查制度的第一天，电话来了！丁零零……是找我的。“什么事找我？”“请下楼。”我来到楼下。“这是什么？”那是我父亲写给我的信。“请问，这又是什么？”信纸上画满线条，还带有小点—一条线下面有四个点，有一个点在线上面的，有线下有两个点或是线上有一个点的，还有一些是点下面还有点，“这些是什么？”我回答道：“是密码。”他们点头：“是的，我们知道这是密码，它们什么意思啊？”我老实回答他们：“我不知道。”他们问：“那好，解码是什么？你靠什么解密？”我说：“我也不知道。”他们又问：“那是什么？”我说：“我妻子给我写的信。”“信上写着TJXYWZ TW1X3，那是什么意思？”我说：“这是另一套密码。”“解码呢？”“我不知道。”他们说：“你收到这样的密码，你说你不知道解码？”“确实如此。”我说，“我们在玩一种游戏。我让他们用密码给我写信，看我能不能破译。明白了吗？他们编密码，然后就寄过来了。他们不打算告诉我解码。”审查制度中有一条规定，不能干预人们日常事务——人们在信件中习以为常做的事情。最后他们说：“那么，请你告诉他们，下次把解码随信一起寄过来。”我说：“可是，我不想知道解码啊！”他们说：“没关系，我们替你把解码拿掉。”这样我们就达成了协议。这样很好，是吧？第二天，我收到我夫人的一封信，信上说：“这信很难写，因为我感到……（空白）从背后监视我。”在那个空白处，是一个精心涂抹过的斑点，那是用墨水消除液留下的痕迹。于是我找到管理局，我说：“你们无权改动我的来信，

如果你们不喜欢，你们可以直接告诉我，但你们不能动它。你们只能看，你们没有权利涂掉信上的内容。”他们说：“别一惊一乍的，你以为审查员是这么检查的？他们会用墨水消除液？他们要是想弄掉什么，会用剪刀直接剪掉。”我说：“好。”于是我写信去问我的妻子：“你在信上用了墨水消除液了吗？”她回信说：“没有，我的信中没有用墨水消除液；那肯定是……”信纸这个地方被剪了个洞。我又去找那个负责人—负责这些事的一位少校，我找他反映情况，发了好一顿牢骚。为这件事我连续好几天去找他们理论。我觉得，作为一个代表，我一定要把事情弄清楚。上校试图向我解释，审查员都接受过专门的培训，他们习惯了以前的做事方式，不理解我们这里要谨慎处理信件的新做法。我想站在我们这群人最前面，出面维护自己的权益，那就需要和他们频繁打交道，于是我每天都给妻子写信，每天也能收到她的信。少校问我：“怎么？你认为我不会坚持工作原则，你觉得我没有诚意？”我说：“是的，你很有诚意。但是，我认为—你没有多大权力。你也知道，三四天过去了，这事情还没有解决。”他说：“我们走着瞧！”他抓起了电话……一切都搞定了。从此，再没有发生信件被剪掉这种事情。

虽然如此，但是写信这事还是带来了一堆的麻烦。举个例子，有一天我收到夫人的一封来信，还附带一张审查员的字条—上面说信里有密码，因为没有附带解码，所以他们把密码截留下来了。后来我去阿布圭基看望妻子，她问我：“对了，那些东西呢？”“什么东西？”她说：“杀虫剂、甘油、热狗、干净衣服。”我说：“等等，那是一张清单？”她说：“是呀。”“那是他们说的‘密码’。”我说。他们把那张清单当作密码了—杀虫剂、甘油等等这些东西。有一天，我闲着没事—开头几个星期都是这样，我们需要几个星期把事情理顺—我鼓捣着那个计算机器，我注意到一些事情。于是，我每天都在演算，我有很多东西要演算—这很奇怪。请注意这个：如果你用1除以243，结果是0.004115226337448559670781893004115，非常有趣，你观察小数点后每三位，可以发现一些规律（004 115 226 337）。不符合规律的是后三个三组数（670 781 893），之后又开始新一轮的循环，然后你可以发现，它们其实还是遵循这个规律的，10-10-13可以等同于114嘛，（670等同于6-6-10，781等同于7-7-11）。我觉得这有点意思。我把它写到信里，可是信被退了回来。它没能通过审查，一起退回来的还有一

张小纸条："请看第17B条款。"我翻到规定第17B条款，上面说："信件只能用英语、俄语、西班牙语、葡萄牙语、拉丁语、德语等语言写，用其他语言写信需要得到许可。"接下来还有:"不准用密码。"于是我在信中加了个小便条，寄到审查员手里，向他说明那些数字当然不能算是密码，如果他拿起笔，用243去除1，计算结果确实是那样—我写得清清楚楚，数字243和数字1-1-1-1-0-0-0一样，不包含任何信息，等等这类的话。因此，我请求他们允许我用阿拉伯数字写信，我喜欢在信中用阿拉伯数字。结果我成功说服了他们。

信件来来往往，总会遇到些麻烦。有段时间，我夫人一直抱怨，说写信的时候老觉得那个审查员就在背后监视着她，这种感觉让她很不舒服。按照规定，我们不能提到审查制度—我们是不允许这么做的，但是，他们又怎么能对她下命令呢？所以他们总是给我写便条："尊夫人又提到审查制度了。"确实，她提到这个了。最后，他们给了我便条，直接提出要求了："请告诉尊夫人不要在信中提及审查制度。"我给她写信："他们要求我通知你不要在信中提及审查制度。"我的回信直接被打了回来。我给他们回了一个纸条："是你们要求我跟她说不要提审查制度的！我究竟要怎么做？再说，凭什么非要我要求她不要提审查制度不可？难道你们向我隐瞒了什么？"很有意思，审查员不得不亲自出面，当面请我转告我夫人："不要告诉她……"但他们有自己的理由。信件从阿布圭基寄过来，他们担心半路被人截获，如果有人看了信，会觉察到我们这里实施审查制度，所以请她尽量表现得若无其事。因此，后来我去阿布圭基的时候，就跟她说："以后我们就不要提审查制度了。"我们惹的麻烦实在太多了，所以，我们最后约定用一种暗号，呵呵，非法的密码。我们约定：如果我的签名后面多了一个点，就说明我又惹上麻烦了，那她就换用另一种密码。因为她生病了，整天坐在那儿，就老琢磨着找一些事情来做。她做的最后一件事，是把一个广告寄给我—她以为这么做不违法。广告说："用拼图玩具给你男朋友写封信吧。这是空白的拼图。我们把它卖给你，你把信写在上面，然后把拼图全拆开，放在一个袋子里寄出。"我收到了这封信，随信还附有他们写的一张便条，上面写着："我们实在没时间玩游戏，请告诉尊夫人，请她写一些普通的信件！"哈哈，其实我们早就准备好另一个方法了。下封信我会这样开头："希望你记着，打开这封信时要小心一些，我们说好的，信里给你带

了一些治胃病的碱式水杨酸铋。”这封信里装满了粉末，我们希望审查的人在办公室里一打开信，粉末就会撒得满地都是，他们会被弄得手忙脚乱。还有，按照规定，他们不能把信里的任何东西弄乱，所以他们得把撒落的这些碱式水杨酸铋全部收集起来……不过，我们没必要非要这么整人不可，是吧？

和审查员打交道多了，我能准确地判断什么样的信能通过检查，什么样的信不能通过。在这方面谁也没有我在行。我还用这个和人打赌赢了点钱。有一天，在围栏外边，我发现了一件事：住在外面的工人懒得绕一个大圈从大门进来，于是他们在离大门很远的围栏上挖了个洞，方便进出。我于是从大门出去，回来时就绕到被挖的围栏那里，从洞口钻进来，然后又从大门出去，再钻洞进来。就这样进进出出，直到那个家伙，那个守大门的中士开始困惑了：这是怎么回事？怎么总见这人往外走，从来没见到他进来呢？自然，这位中士的反应是报告中尉，还准备把我送进监狱。我向他们解释：“围栏上有个洞。”你知道，我总喜欢给人指点迷津，我告诉他们围栏那里有个洞。然后我和一个人打赌，我说自己可以给上面寄一封信，在信里说清楚围栏哪个地方有个洞，并把这封信寄出去。我确实做到了。我在信上说：“你们该看看他们是怎么管理这个地方的。”—你们知道，上面准许我们反映情况的—“围栏离某个地方71英尺处，那里有个洞，尺寸有多大，你可以轻轻松松钻过去。”好吧，他们还有什么办法吗？他们不能睁眼说瞎话，说那里没有我所说的那么一个洞。我的意思是，他们能做什么呢？那里确实有个洞，他们只有自己认倒霉，他们本来应该把洞补上的！我就这样把这事情摆平了。我还给上面寄过这样一封信，信里反映了我组里的一个男孩如何在深更半夜被军队里那些白痴叫醒，在刑讯室的强光照射下被严厉拷问，因为他们查出了他父亲的一些事情或是其他什么事。具体情况我不知道，总之，他们怀疑他是共产党。他的名字叫卡曼，他现在是个名人了。

当然，还有其他一些事情。我总是想方设法把一些事情抖搂出来，就像指出围栏上有个洞一样，不过我习惯用间接的方式。我想引起大家关注的一件事情是：项目刚开始的时候，我们拥有一些至关紧要的顶级机密：我们已经掌握了很多铀的情况，它是怎么起作用的，等等。所有这些资料都被保存在文件柜里，文件柜是木制的，只配了常见的普通小

挂锁。为了提高保险系数，厂家在文件柜里设置了各种各样的东西，比如一个可以落下的用来拦挡的杆，它被一个挂锁锁着——不管怎么说，那充其量也就是一个挂锁。情况更为严重的是，你甚至不必开锁就能把材料从这些木头柜子中拿出来—你只需要把它向后倾斜一下，你要知道，它最下层的抽屉只是用一根小棍支着，最底下的木板有个洞，你可以从下面把文件抽出来。那段时间，我一直偷摸着去开锁，并告诉大家开锁是件很容易的事情。每次开大会，也就是大家都在场的时候，我就站起来说，我们手上有这样重要的机密，我们可不能把这些重要机密保管在那样的木头柜里。这些锁太差劲了，我们需要用更好的锁。有一天，特勒在会上站起来对我说："没关系，最重要的机密材料我不放在文件柜里，我把它们放在办公桌的抽屉里。这样更保险吧？"我说："我不敢保证，我没看过你的办公桌抽屉是什么样的。"那次会上，他坐得比较靠前，我坐得比较靠后。会议继续进行，我偷偷溜出会议室，下楼去看他的办公桌抽屉。呵呵，我甚至不用打开他办公桌抽屉的锁。其实，你只需要把手从办公桌背面底下伸过去，就能掏出抽屉里的纸，像厕所里的抽纸盒那样，你抽出一张纸，那张纸就会带出另一张纸，然后再带出另一张……我掏光了整个抽屉，拿出了里面所有的东西。我把这些东西放在一边，然后上楼回到会场。会议正好结束，大家正往外走，我混进人群，随着人流往外走……我快步赶上特勒，对他说："嗨，顺便让我看一下你的办公桌抽屉吧？"他说："没问题。"于是我们一起走进他的办公室，他把自己的办公桌指给我看。我说这桌子看起来真棒。我说："我们来看看里面放了些什么。""很高兴让你看看这些东西，"他一边说，一边拿出钥匙开抽屉，"如果你自己还没有看过的话。"跟特勒先生这样高智商的人开玩笑，有点让人沮丧：他的反应太快，从觉察到事情不对劲，到完全弄明白发生了什么，这过程太短，你丝毫享受不到捉弄人的乐趣！

哈哈，还有很多和保险柜有关的有趣的事，不过它们和洛斯阿拉莫斯没有什么关系，我就不多说了。我要讲另外一些问题，很特殊的问题，也很有趣。其中一个和橡树岭工厂的安全问题有关。洛斯阿拉莫斯负责制造原子弹，但是分离铀同位素的工作在橡树岭，他们要分离铀238、铀236和铀235，其中只有铀235是可以裂变的，是吧？他们刚刚从一个实验对象中获得微量的铀235，而与此同步，他们已经开始大量

提炼铀235了。那儿有个大工厂，到时会有大量的化学品，他们要对这些已经提纯的材料进行再次提纯，为下一阶段工作做准备，这些材料要进行多次提炼。也就是说，一方面他们刚刚在实验室得到一点点样品，这还是试验性质的，而另一方面已经在大规模处理那些化学品了。他们要学习怎样分析它，确定其中铀235的含量。我们在洛斯阿拉莫斯指导他们怎么做，但他们总是做不到位。最后，塞格雷（Segrè）发话了，要想解决这问题，唯一的办法就是他亲自到橡树岭看看那边的人是怎么干活儿的，这样才能弄清楚他们的分析为什么总是错的。但是，军方不同意，理由是：我们的纪律规定，洛斯阿拉莫斯所有的信息不得外泄，压根儿不能让橡树岭知道铀的用途，他们只要知道自己要做什么（分离铀）就行了。我的意思是，橡树岭的高层管理人员知道他们在分离铀，却不知道那颗炸弹的威力，或者这颗炸弹的工作原理是什么等等，而一线的工人根本不知道自己在分离铀。两地信息不能沟通，这种情形正是军方希望看到的。但是，塞格雷始终坚持要去橡树岭看一看，他说这很重要，如果橡树岭的分析永远做不对，那么整件事情都要泡汤。于是，塞格雷去了橡树岭，查看那里的人是怎么做事的。他在厂区里到处走动，碰见工人们用车拉一大罐水，绿汪汪的水，那是硝酸铀。他问："这水提纯以后，你们也这样搬运吗？你们都是这么干的吗？"那些工人说："当然啦，有问题吗？"他再问："难道这样不会爆炸吗？"工人很奇怪："啊？爆炸？"这时军方发话了："你要知道的，我们不该泄露任何信息。"后来事实证明，军方那时已经知道造一颗原子弹需要多少材料，比方说20千克；他们也知道，工厂里根本不会有那么多原料、提纯过的原料，所以也就不会有爆炸的危险。但是，他们不知道，中子在水中减速后，它的活跃程度会大大提高。所以在水中，就那20公斤而言，不到十分之一的量，不，不到百分之一的原料就能引起化学反应，从而造成辐射。这虽然不会造成大爆炸，但是它产生的辐射，足以杀死周围所有的人。因此这是很危险的，而上面根本就不关注这些安全隐患。

于是，奥本海默发了一封电报给塞格雷：把整个厂区走一遍，留意一下我们应该格外注意哪些地方；还有那里的人设计的工作流程。与此同时，我们在计算：为防止爆炸发生，最多能在一个地方放多少原材料？有两个小组负责这项计算任务，克里斯蒂的组负责计算液态的临界量，我负责计算装在盒子里的干粉的临界量，呃，我的小组。我们算出

了那些量。上级准备派克里斯蒂去橡树岭，告诉那里的人目前的处境。我高高兴兴地把我这组算出来的数据全部交给克里斯蒂，我对他说："所有的资料都在这儿了，你去走一趟吧。"可是克里斯蒂得了肺炎，只能换我去。在这之前，我还从来没有坐过飞机，这回上面让我坐飞机过去。他们把这些机密资料用一个配有带子的小东西绑在我的背上！那时的飞机就像公交车，不一会儿就会降落在什么地方，除非两站之间的距离比较远。飞机停在一个地方，你就要等着。有一次，一个站在我身边的家伙，手上舞着一个钥匙链，嘴里说着什么"这年头，如果没有个优先权，恐怕就上不了飞机喽"。我实在忍不住，就回应了一句："呵呵，我不知道现在的形势，我倒是有个优先权。"没过一会儿，要上来一些将军，工作人员要把排在第三等级的一部分乘客赶下这班飞机。不过没关系，我属于第二等级乘客。那个乘客也许会写信给他的国会议员—如果他自己不是国会议员的话—战争期间，为什么让这些毛头小伙子有优先权坐飞机到处跑？他们到底想干什么？不管怎么说，我到了橡树岭。我做的第一件事，是请他们带我去厂区走走，但我什么也不说，我只是看，仔细观察每一样东西和每一件事情。我发现那里的情况比塞格雷报告的还要糟糕，因为那次他是第一次去，所以有点搞不清楚状况。他只是注意到一些地方堆着大量这样的盒子，但是他没有发现，另一个房间里也堆着大量的这些盒子，而这两个房间可以说只有一墙之隔。他没有注意到诸如此类的问题。你要知道，如果把这类化学品过多地堆放在一起，就会爆炸起来。我走遍了厂区的每个角落，虽然我的记忆力不好，但在高强度工作的时候，我的短期记忆力很好，所以我能记得所有奇葩的现象，比如92号，呃，97号建筑，以及大桶的数目等等。那天夜里我回到住处，把整个情况过了一遍，确定安全隐患在哪些地方，以及应该怎么解决—这很容易，你可以把镉放在溶液里去吸收水中的中子；你按照规定把盒子分开存放，不要堆得太密集；不要把太多的铀放在一起；等等。我要拿出所有的例子，努力列出所有我能想到的例子，还要解释冷冻过程是怎么一回事。我觉得，除非你了解整个运作原理，否则你不可能保证这个工厂安全运行。因此，第二天要开个大会。

哦，我忘了说一件事，在我离开之前，奥本海默对我说："呃，你去橡树岭的时候，那里有些技术骨干，比如朱利安·韦伯先生，还有这位先生、那位先生等等。你要保证这些人都到会，一定要告诉他们是怎么一

回事，你知道的，安全问题；你务必要让他们真正明白（安全问题事关重大）——他们是负责人。”我说：“如果他们不来开会怎么办呢？到时，我该怎么做呢？”他说：“那你就说—否则，洛斯阿拉莫斯不对橡树岭的安全负责！”我说：“你的意思是，我——无名小卒理查德，到那儿去对他们说……”他说：“是的，无名小卒理查德，你去做这件事。”我真的这么快就出息了！所以，当我到了那儿，千真万确，我到那儿的第二天就开会了，公司的所有人，包括公司的大头头、我要求到会的技术人员都来了，还有将军们和其他人，那些对安全问题感兴趣的人，那些管理岗位的人，等等。那个大会是专门为至关紧要的安全问题而开的，因为如果安全没有保障，工厂可能再也办不下去了。我敢肯定，如果不是有人注意到了这里的安全问题，这厂子可能已经炸没了。由于事关重大，当时有个中尉负责照顾我，他告诉我：“上校说了，你不能给他们讲中子如何发生作用等等这些细节，因为我们希望这两个部门在这么机密的事情上不要通气。你只需要告诉他们如何安全地保管这些化学品就可以了。”我说，在我看来，如果他们不知道这些原理，他们就不可能理解并遵守那一大堆规则，除非他们知道这其中的原理。所以我的观点是，我必须告诉他们原理，否则洛斯阿拉莫斯不对橡树岭的安全负责！于是，中尉向上校报告了我的态度，上校说：“我考虑5分钟。”他向窗口走去，停下来，站在那里考虑。他们最擅长这个了—他们善于做决定。是否向橡树岭工厂的人们透露原子弹的工作原理，能在这样的事情上做决定，并且能在5分钟内断然做出决定，我觉得十分了不起。因此我对这些军方人士非常钦佩—不管给我多长时间考虑，我都没有魄力在任何一件重要的事情上做出决定！

最后，5分钟过去了，他说：“好吧，费曼先生，你去讲！”于是我坐了下来，把中子所有相关的情况都告诉了他们：中子如何起作用，等等，过多中子聚到一起，你得把原料分开来放置；镉吸收中子，速度慢下来的中子比快速运动的中子性能更活跃，等等—在洛斯阿拉莫斯，这些只是基本的常识，但在橡树岭，他们从来没有听说过这些知识，所以在他们眼里，我成了了不起的天才，是天神下凡来了！所有这些他们以前不理解，甚至闻所未闻的现象，我全知道，我还能给他们举事例、给出数据和其他东西。因此，我这个在洛斯阿拉莫斯名不见经传的小人物，到了橡树岭竟成了超级天才！我这次橡树岭之行促使他们做了一些

决定，他们成立了若干个小组，自己学着去做计算；他们还着手重新设计工厂。工厂设计师来了，此外还打算建立另外一个工厂专门处理分离后的化学物质，那些建筑设计师、工程师和化工工程师也都来了。还有其他一些人也来了。这时，我却要离开那里了。他们让我几个月后再来，他们要重新设计铀分离工厂。

几个月之后，也许就是一个多月之后吧，我又去了一趟橡树岭。这时，斯通-韦伯公司的工程师已经完成了整个工厂的设计，请我来把把关。呵呵！检验一个还没有建成的工厂？我可不知道该怎么办！我跟着那些人进了一个房间。你知道，我身边总跟着朱姆沃尔特中尉，他负责照顾我—这个你们懂的，所以我走到哪儿，他跟到哪里。他把我带到一个房间，那里有两位工程师，还有一张超长的桌子，一张硕大无比的大桌子。桌子上铺着一张和桌子一样大的设计图，哦，不是一张设计图，是一摞设计图。我虽然在学校学过机械制图，可是我并不擅长看图纸。他们开始跟我解释这些设计图，因为他们认为我是个天才，啥都懂。他们是这么开头的："费曼先生，请看，工厂是这么设计的。你知道的，我们必须避免的一件事就是堆积问题。"还有这样的问题—有一个用来储存东西的蒸发皿，假如发生阀门堵塞之类的情况，那里就会积聚过量的东西，那就会引起爆炸。他们向我解释说，在整个工厂的设计中，没有单阀门，每个地方至少都要有两个阀门，所以，即使某个阀门堵塞了，也不会发生事故。他们接着解释工作原理：四氯化碳从这儿进来，硝酸铀从这儿进去，它从这儿上去，又从这里下来，它穿过楼板，穿过这些管道上去，再从二层的管道上去……他们在图纸上比画着，从这里下去、上来，再从那里下去、上来，他们飞快地解释着这个万分复杂的化学工厂。我整个人都蒙了，更糟糕的是，我根本不知道图纸上那些符号代表着什么！有个符号，是一个方块符号，中间打了个叉，我一开始以为那是窗子，那要命的图纸上到处都是这些符号。满眼看去，图纸上都是带有这种要命符号的线条。我想，这是窗户吧，哦不，不可能是窗户，因为它并不总是出现在图形边缘。我真想问问他们那是什么。你一定有过这样的经历—有疑问时你没有马上问，如果及时提问了，那就没有问题了。但是，他们实在已经解释太久了，你也犹豫得太久了。如果你现在问他们，他们会说："你怎么早不问啊？敢情我们都白说了呀？"我真不知道如何是好。我暗自琢磨：我向来都很走运，（要不这次也试试？）

你们可能不相信这个故事，但我发誓，这好事绝对是真的发生了，我是如此幸运啊！我不停地想啊想，怎么办？该怎么办呢？我终于有了一个想法：也许那是个阀门？为了弄清楚它到底是不是阀门，我伸出一个手指，按在第3页图纸的中心位置，说："如果这个阀门堵塞了，会发生什么情况？"说这句话的时候，我还想着他们会这样回答："不，先生，那不是阀门，那是个窗户。"真是幸运，我蒙对了。一位工程师看了同伴一眼，说："噢，如果那个阀门堵住了……"他开始在图纸上上上下下查看，另一个家伙也围着图纸上上下下、前前后后地忙活起来。最后他们对视了一会儿，然后转过头来，对着我说："先生，您说得太对了。"最后，他们卷起图纸走了出去，我们也走出房间。那个形影不离跟着我的朱姆沃尔特中尉说："您真是个天才！那天您只在厂里走了一遍，第二天就和他们说90号楼207房里的C21号蒸发皿有问题。从那时候起，我就知道您是个天才。"他说："但是您刚才的表现，真是太神了。我想知道，您到底是怎么做到的？"我告诉他："你得先试着去弄明白那东西是不是一个阀门。"

除此之外，我还有另一个任务。我们需要做大量的计算，用的计算工具是Merchant牌计算器。我顺便给你们说说洛斯阿拉莫斯那里的工作情况—那儿也用同一个牌子的计算器。我不知道你们是否看过它们的样子，那是一种带有数字的手动计算器，你得用手去推，它们能做乘、除和加法运算，等等。不过，那时的计算器用起来很费劲，不像现在的机器这么容易操作，而且它们只是些小机械产品，维修也很麻烦，必须送回厂家去修。按照标准，我们应该有专门的维修人员，可是我们没有，所以，每当机器出问题了，只能送回厂家去维修。很快，我们就没有计算器可用了，于是我和其他几个人就试着动手打开计算器的外壳。这本来是不允许的，因为有这样的规定："禁止打开机器外壳，否则概不负责……"我们还是打开了外壳，并且学到了很多东西。拿我们打开的第一台机器来说，里面有根打了一个眼的杆，还有一根这么挂着的弹簧。显然，弹簧应该穿过那个小洞—就这么简单。总之，上帝保佑，我们学会了怎么修理这些机器。后来我们的手艺越来越精，那些要求更高的维修，我们慢慢也能上手了。当然，遇到过于复杂的问题，我们还是要把它们送到厂家维修，但是，简单的维修，我们自己就能解决了，我们的工作也就能继续开展下去了。我还修过一些打字机。最后由我负责修理

所有的计算器，其他人就不用动手了。我修过几台打字机，可是有个机械车间的家伙比我内行，所以就由他负责修理打字机；我呢，专门修理加法计算器。

好了，言归正传。我们确定了核心问题，就是要确切弄清楚原子弹爆炸过程中发生了什么：在核爆炸时，我们把东西（中子）推进去，随后中子又被大量释放出来。弄清楚这个过程中究竟发生了什么，我们就能精确地计算出爆炸释放出来的能量。而这需要海量的计算，远远超出我们的能力。一个名叫斯坦利·弗兰克（Stanley Frankle）的同事，他很聪明，他想到IBM的机器也许能完成这样的计算。IBM公司生产商用的计算机器，比如被称为制表机的加法机器，它可以列出金额；还有一种乘法器，那种机器就像一个大盒子，你把卡片放进去，它会从每张卡片上取两个数字，相乘后把结果打印在卡片上。此外还有校对机和分类机等。斯坦利·弗兰克决定把他的想法付诸实践，他想出一个很好的点子：如果在一个房间里放上足够多的这种机器，我们就可以循环处理卡片。我想，每个从事过数字计算的人，都清楚我在说什么，但在当时，利用机器进行大规模数据处理，却是一件新鲜事。

我们已经在加法器上做过此类工作。通常情况下，你自己要一步步计算，所有的步骤都得自己来。但是这下不同了—你首先用加法器计算，然后用乘法器，最后再用加法器。就这样循环操作。我们都认为这是一个好办法，它可以解决我们面临的问题。就这样，他设计了这么一套程序，并向IBM公司订制这样一批机器。我们发现军队里有人曾接受过IBM训练。而我们需要这么一个人来修理和维护IBM的机器，保证它们正常工作。他们一直说要给我们派这么一个人，但总是拖着没解决。可是我们的任务总是那么急。我不得不向他们解释我们的处境，我们要做的每一件事以及我们要疲于奔命来完成任务。在这种特殊情况下，我们研究出了整套人工计算所需的所有步骤，以及机器计算所需的步骤，比如乘上这个数，然后加上这个数，再减掉那个数。我们设计好了程序，但是我们没有机器来测试一下！那么我们是怎么解决这个问题的呢？按照我的安排，我们准备了一个房间，里面坐满了女孩子，每个人面前都有一台Merchant牌计算器。这个女孩负责乘法运算，那个女孩负责加法运算，还有一个女孩负责算出立方数；我们手上有很多卡片，是

索引卡片；其中一些女孩的任务就是计算这个数字的立方，然后把计算结果传给下一个人。这个人相当于乘法器，那个人则相当于加法器，我们用人力代替机器进行循环运算，解决了所有的困难。我们就用这种方法工作。结果，我们计算的速度（大大提高）—之前我们从来没有组织过这样的集体计算，每一个做计算工作的人，都需要自己一个人完成所有的计算步骤。但是福特（Ford）想出了这个好主意，它确实比其他任何方法都要快得多，照他这个办法，我们的计算速度与IBM机器预计能达到的计算速度不相上下。唯一不同的是，IBM机器不会累，它们可以全天候工作，但是这些女孩子一会儿就累垮了。不管怎样，我们解决了这个问题。最后，机器总算运来了，可是，维修的人还没有到位。于是，我们就自己动手组装了这些计算机器。这些机器在当时算是非常复杂的高科技机器了，这些计算机—那些大家伙运过来的时候只有部分是组装好的，连着很多线，还有安装图纸。我们就自己动手组装，我，斯坦利·弗兰克，还有另外一个人。组装过程中，我们遇到了一些麻烦。主要的麻烦就是不断有大人物跑过来对我们碎碎念："你们会把东西弄坏的，你们别把东西弄坏了。"我们把机器部件组装起来，有时候能运行；有的时候出差错了，机器就不能运行。我们就摸索着鼓捣机器，努力让它们运行起来。我们最终没能让它们全部运转起来，在我组装最后一台乘法器时，我看见里面有个部件弯了，但我不敢掰直它，就怕它会啪的一声折断了。他们总是警告我们，别把东西整坏了。最后，按照计划，IBM公司的人来了。他把我们没有搞定的部分组装好，我们的程序也终于运行起来了。但是，那台曾经把我难倒的乘法器，他也搞不定。三天过去了，他还在那台机器边上忙乎。我走过去说："噢，我注意到那个地方弯了。"他说："噢，原来问题出在这儿！"（打个响指）—就这样，全部弄好了。整个过程就是这样。

好，弗兰克先生开始实施他的计划了，与此同时，他也得了一种病—"计算机病"。现在每个用计算机的人都知道这个毛病，那种病非常厉害，会干扰整个工作。这是我们面临的一个严重问题。所谓计算机病，就是你一"玩"上计算机，就会上瘾。计算机真是很奇妙。你手上操控着那些x转换开关，如果是偶数就是这个计算结果，如果是奇数就是那个结果，如果你够聪明，很快你就能在一台机器上做越来越复杂的计算。只不过，没过多久，整个系统就瘫痪了。他对工作不再上心，也不再管

理手下，整个系统运转得很慢、很慢。但是，真正的麻烦是，他一直坐在一间办公室里，琢磨怎么让制表机自动打印出反正切值，然后机器就开始打印，成排成排地打印，扑哧，扑哧，扑哧，一边打印一边还自动用积分计算反正切值，整张表都是反正切计算结果。其实，这毫无意义，因为我们人手一份反正切表。不过，如果你用过计算机，你就会理解他为什么会得这种病。计算机能让你知道自己究竟能做多少事情，这也是一种乐趣。他第一次接触这机器，就染上了这种病，这个可怜的家伙—整个项目都是他发起的，可他却得了这种病。

所以，他们要我停下手上的工作，让我去负责IBM组。我对这种计算机病很是警惕，尽量避免沾染上这种毛病。我有个很出色的团队，尽管他们在9个月里只做了3个项目。关键问题在于他们从未把真相告诉这群小伙子—他们从全国各地的高中挑选有工科潜力的聪明男孩，组成了这支“特殊工程派遣队”。军方把他们送到洛斯阿拉莫斯来。他们把这帮小伙子安置在军营里，可是什么情况都不向他们透露。他们来这里工作，被分配到IBM小组，整天打一些莫名其妙的孔，和一些莫名其妙的数字打交道，却没有人告诉他们这到底是为了什么。很自然，工作进展很慢。我说，现在最重要的事情，是让这些技术岗位上的大男孩知道他们在干什么。奥本海默就去和安全局的人交涉，终于争取到了特别许可。于是我就去做动员工作了，给他们做了一次鼓舞人心的演讲，明白地告诉他们，我们做的是什么性质的工作。结果他们都很振奋：我们是为这场战争服务，我们明白这意味着什么。他们明白这些数字的意义了。如果算出来的压力越高，那就意味着释放出来的能量越多，等等。他们明白了自己正在做什么，于是，他们的工作态度有了180度的大转变！他们开始动脑筋发明更好的办法，他们改进了工作方案，他们夜里加班，而且不需要人监督。他们不需要任何物质激励，他们心里都清楚这项工作的意义。他们还发明了好些程序供大家使用。我的这些小伙子真的扛过来了！我们需要做的仅仅是告诉他们真实情况，这就够了。如果还是原来的态度：“不要把机密透露给他们”“就让他们打洞”……拜托！过去9个月里，他们只完成了3个项目；现在，他们用3个月时间做了9个项目，速度比以前快了将近10倍。我们完成这些工作当然是有窍门的，其中一个是这样的：我们需要把一捆卡片循环运算一番，先加，然后再乘。卡片要在房间里的这些机器里走上一圈，它们在不同的机器

里进进出出，所以速度比较慢。我们想出一个方法：一套卡片里有好几种不同的颜色，把同样颜色的卡片放在一起过机器，这样，我们可以同时处理两个或三个问题。你知道，这已经是另一个问题了。这种颜色的卡片在做加法运算，同时另一种颜色的卡片做乘法运算。通过这种统筹的方法，我们超额完成了很多项目。

最后，在战争快要结束的时候，也就是我们必须在阿拉莫戈多12试爆之前，我们要解决的问题是：爆炸将会释放多少能量？我们已经计算过多种不同方案下被释放出来的能量值，而最终选定的那个方案，我们却从来没有在计算机上演算过。鲍勃·克里斯蒂过来了，他说，我们希望在一个月内知道结果，或者更短的时间，三个星期—我记不大清楚了。我说："这不可能。"他说："你看，你们一星期就能处理这么多问题。而现在，给你们两星期或三星期，只要解决一个问题。"我解释说："我知道。可是这个问题需要的时间要多很多。我们都是同时处理多个问题，如果一个个按顺序来，需要的时间就很长，没有更快的法子。"但是，他前脚刚走，我就开始思考：有没有办法算得更快一些？比如，我们不让机器做其他任何事情，这样，就不会有干扰了，等等。我就开始琢磨这些事情。我给小伙子们下了战书，在黑板上写了一句话："我们能做到吗？"他们齐声作答："能！"我们所有人两班倒，轮流转。大家说着诸如此类的话：我们会放手一搏。我们要放手一搏！于是，我们商量好，其他所有工作要为它让路，我们集中精力，只做这一件事。然后他们就投入了工作。

那时，我的夫人在阿布圭基因病去世，我必须过去。我借了富克（Fuch）的汽车，他是我在宿舍认识的朋友。他有一辆汽车—他就是用这辆车把情报带到圣大非13去的。他其实是个间谍，可我当时不知道这些。我借了他的车，就往阿布圭基赶。那该死的车一路上爆了三次胎。我办完妻子后事，就回到营地去，我径直走进办公室—因为我负责那摊事情，而我已经三天没有去了—那里一副人仰马翻的景象，为了计算出沙漠里那个试验所需的数据，他们忙得不可开交。我走进房间，发现那里有三种不同颜色的卡片：白色、蓝色和黄色。我说："嘿，你们还在忙别的事情？你们记着，现在只能做一件事！"他们说："你先出去，先出去。你等一下，我们再给你解释。"所以，我就待一边等着。事情是这样

的：在工作过程中，有时机器会出错，有时他们会放错卡片，这些情况都发生过。我们之前的处理方法是：从头来过，所有卡片重新走一遍。但是他们注意到一个情况，卡片通过机器时有自己固有的位置和深度—就空间而言。一组卡片中某一张卡片出了问题，在机器里走上一遍后，它只会影响邻近的几张卡片；下一循环也只能再影响几张挨着它们的卡片，就这样发展下去，最终会影响整组卡片。举个例子，一组50张卡片，第39号卡片出错了，只会影响到前边两张卡片，也就是说37号、38号和39号卡片会出问题；卡片再过一遍机器，出问题的是36号、37号、38号、39号和40号。等这些卡片第三次过机器时，它会影响更多的卡片，错误就像传染病一样扩散开来。他们发现一张卡片出现了问题，想重新过一遍机器的时候，他们想出了一个办法。他们只需要重新计算一小部分卡片，也就是那张出问题的卡片的前后10张。因为10张卡片通过机器的速度，要比50张卡片通过机器的速度快得多。所以，当有问题的50张卡片还在机器里跑的时候，他们就把这10张卡片很快过了一遍。计算速度变快了，但是又带来一个问题—他们得把整组卡片封上，并纠正错误。他们很聪明，是吧？那帮小伙子就是这样干活儿的。为了更快地完成任务，他们的确很卖力，也很有头脑。别的路子都走不通。要是停下来纠正错误，我们就会浪费很多时间，我们就完不成任务了。这就是他们做的事情。当时我进来的时候，他们发现一张蓝色卡片出错了，于是他们就拿了一叠张数少一些的黄色卡片，你知道，这些黄色卡片在机器里走一遍，速度要比那叠蓝色卡片快。处理完这个问题后，他们又得去处理那堆白色卡片—他们要把有问题的卡片拿走，换上正确的卡片，再让一切正常运转。这让他们焦头烂额，你能想象那是什么样一个场景，很容易把人弄糊涂。可是，你不能犯错！他们忙着应付三摞卡片，让它们过机器，还要把所有的卡片封起来，这时候，上司进来了。“你别打断我们。”他们说。于是我就识趣退开，让他们自己忙乎，最后结果也出来了。我们按时完成了任务，情况就是这样。

接下来，我想跟你们简单说说我遇到的一些人。最开始我是最基层的工作人员，后来带队做了一个小头头。但是除了评估委员会的那些大腕—我在洛斯阿拉莫斯见到的那些科学家，我还认识了其他一些很伟大的科学家，能认识那么多杰出的物理学家，可以说是我人生一大幸事。他们的名字我以前都听说过，名气或大或小，但是顶尖的科学家全都来

过洛斯阿拉莫斯。这里头当然包括费米[14]。第一次他是从芝加哥过来的，给我们当了一阵顾问：如果我们有什么问题，他可以帮助我们解决。我们和他一起开过会，当时我负责一些计算工作，并且取得了一些成果。这些计算很复杂，算起来很困难。一般来说，我是这方面的专家，我总能预料到计算结果；或者在得到结果后，我总能解释结果为什么是这样。但那一回的计算太复杂了，我不能解释为什么会这样。于是我告诉费米我正在处理这个问题，并开始计算—他说："等等，在你告诉我结果之前，让我想想。"接着，他会这样说，结果应该是这样（他是对的），他还能指出原因是什么。他的解释非常清晰明了……你看，他在做我所擅长的事情，而且做得比我好上10倍。他给我好好上了一课。

还有就是冯·诺依曼，他是个大数学家。在学术上，他这人有超乎寻常的洞察力，他建议我不要花太多的时间钻研这里的事情。我们用计算机计算时，会发现一些很有趣的现象，可是，这些现象的出现好像不太规律，他就给我们解释其中的原因。那真是非常好的一个专业建议。星期天或其他一些时间，我们经常会结伴去散步，放松一下。附近的峡谷是我们常去的地方，平常和我们一起散步的有贝特、冯·诺依曼和巴赫（Bacher）。和他们一起散步真是一大乐事。冯·诺依曼的一个想法很有意思：你没有义务为你所在的这个世界负责。这是他教会我的一件事情。冯·诺依曼的这个忠告，让我卸掉了一个普通个体无法承受之重—就一个个体背负整个社会的责任而言。从此之后，我变成了一个很快乐的人。这是冯·诺依曼在我心里种下的种子，他教会我不用把全世界的痛苦都背在自己身上。

我还认识了尼尔斯·玻尔[15]，很有意思。那时候，他的名字还是尼古拉斯·贝克，他是和他的儿子吉姆·贝克一起来的，他儿子现在的名字叫阿格[16]。他们从丹麦过来做访学。大家都知道，他们父子俩都是非常有名的物理学家。对其他所有物理学大腕而言，玻尔简直就是一个神，他们在玻尔面前都要俯耳倾听。他要在讨论会上发言，我们大家都去了，每个人都想一睹伟大的玻尔的风采。会场上人很多，我坐在后面的一个角落里。会上，我们谈了原子弹的一些问题，现场还展开了一些讨论。那是我第一次见玻尔。从他进场，直到最后他走出会场，整个过程中，我只能坐在一个角落里，在密密匝匝的脑后勺的缝隙里看玻尔一眼。第二

天他还要来。在那天早上，我接到一个电话：“你好，是费曼吗？”“是的。”“我是吉姆·贝克，”那是玻尔的儿子，“我父亲和我想跟你谈谈。”“我？我是费曼，我只是个……”“没错，就是你。”于是，早上8点，在别人还没有察觉的情况下，我去赴约了。我们走进技术区的一间办公室，玻尔说：“我们正在考虑一个问题，怎样让原子弹的威力更大，我们想到了这些办法……”我说：“不行，这没有用，不会有效果的……”他又问：“那么，这样行不行？”我说：“听起来稍微好一点点，但是这个地方根本行不通。”我们就这么反复讨论。在这种事上，我总是不开窍，我从来没有意识到自己是跟这些大人物说话。我眼睛里只有物理，如果我觉得一个想法很糟糕，我就会直说；如果某个想法很好，我也会直接说好。我说话就是这么直截了当，我一向如此。如果你也能做到这一点，你就会知道，这么做感觉很好、很痛快。我很幸运，就像我在图纸那件事上那样幸运—我能够做到这一点，我很幸运。我们就这样讨论了两个小时左右，前前后后讨论了许多想法，你来我往，争论了半天。伟大的玻尔一直拿着烟斗在点烟，那火老灭。他说话我不大听得懂，咕噜咕噜的，很难懂。他儿子的话倒是容易理解一些。最后，他说：“好了，”他点上烟斗，“我想，现在可以叫那些大人物过来了。”于是他们把其他所有人召集过来，开始讨论。他儿子后来告诉我，事情是这样的：上一次开会时，玻尔对儿子说：“你记得坐在后面那个小家伙的名字吗？他是唯一不怕我的人，如果我的想法不靠谱的话，他会直说出来。所以下次我们要讨论问题时，不能和那些人谈，他们只会说‘对，对，玻尔博士’。先找那个家伙，我们先和他谈谈。”

我们完成计算后，接下来的事当然就是做试验。我们必须做这个试验。那时我正好在家休短假，因为我的夫人去世了。洛斯阿拉莫斯寄来一封信，上面说：“孩子要出生了，预产期是某天。”我马上飞了回去，我刚赶到那里的时候，班车正要出发去试爆现场，我连自己的房间都没进就上车了。到了阿拉莫戈多，我们远远地在一个地方等着，离中心现场有20英里远。我们有个无线电收音机，我们要通过它了解前方的情况，比如试验什么时候开始，等等。一开始，收音机不能正常工作，我们对前方的情况一无所知。一直到预定试爆时间的前几分钟，收音机才开始工作，他们告诉我们还有20秒就试验了。他们给离现场较远的人们发了墨镜，比如我们—有些人离得要近一些，6英里—你可以戴上墨镜

来看试爆现场。我们离试爆现场20英里，这么远的距离，居然还给我们发墨镜！你拿到一副墨镜—其实透过墨镜你什么也看不到。我想到一点，真正会伤害眼睛的光线只有紫外线，而绝不是强光。于是我进了一辆卡车，躲在挡风玻璃后面，紫外线穿不过玻璃，这样我就安全了，而且我还可以看到想看的东西。而其他人绝对看不到。好了，时间到了，那儿出现了巨大的闪光，如此耀眼，我很快在卡车的地板上看到了一个紫色光斑。我说："不对，那是视觉后像。"我探起身，看见那道白光逐渐变成黄色，再变成橘色。空中出现了蘑菇云，然后又消失了，那是因为冲击波作用下空气被挤压和膨胀的结果。最后，出现了一个橘红色大球，中心非常明亮，这个橘红色大球开始上升，小幅度翻滚着，球体边缘有点发暗。你会发现，这是一大团烟雾，里面的火焰往外喷射光和热量。我看到了这一切，而这一切的发生其实只在一瞬间，整个过程大概也就一分钟吧。这个从异常明亮变暗的整个过程，我都看到了。我恐怕是唯一真正看到这个过程的人，第一次"三位一体核试"17。我身边的人都戴着墨镜，而6英里处的人也不可能看到这个过程，因为他们都被要求躺在地上、闭上眼睛，所以没有人看到这幅景象。和我在一起的人都戴上了墨镜，我是唯一用肉眼直视爆炸现场的人。最后，大约一分半钟之后，突然传来一声巨响，"嘭"的一声，然后是一阵摇晃，像打雷一样，这让我相信原子弹确实爆炸成功了。整个过程，在这一分钟内，没有人说一句话，大家只是静静地看着那个地方。但是这一声爆炸终于让大家松了一口气，我心里的石头也放下了，因为隔这么远传来如此真切的一声巨响，这意味着试验真的成功了。当声音传来时，站在我身边的一个人问我："那是什么东西？"我说："那是原子弹。"那个人是《纽约时报》的威廉·劳伦斯（William Laurence），他是来采访的。他要写一篇文章，记述整个过程。我负责接待他，结果我发现，对他来说，要了解这个事件，技术性太强了。

后来，普林斯顿的史密斯先生来了，我带着他参观洛斯阿拉莫斯。有一天，我们走进一个房间，在一个架子的最里头，看到一个小球，比这个尺寸稍微小一点，有这么大，镀了银似的—你把手放在上面，那是温热的。它有放射性，那是钚。我们站在门口，谈论起那个小球。这是一种新元素，人造的新元素，地球上不存在—也许在地球形成初期曾经短暂存在过。在这房间里，它与世隔离，有放射性，还有别的一些属

性。我们造出了这种元素，它是无价之宝，无与伦比。你也知道，人们说话的时候，手脚免不了有些小动作。史密斯先生一下一下踢着门挡，我说，这门挡可比这门更配这个房间。那个门挡是半球形的，用一种黄色的金属做的—其实就是黄金，用黄金做成的这么大的一个半球形物体。情况是这样的：我们需要做一个实验，为了节省中子起见，我们要看看不同的材料反射中子的情况，所以我们没有用太多的钚。我们用很多金属做实验，比如铂金、锌，还有铜和黄金。实验中要用到金子，所以我们就有了一些金片。有人就想出了一个绝妙的主意，用这些金子做成一个门挡，守护着门里边的钚，这真是绝配。

原子弹成功爆炸，我们得到确切消息后，洛斯阿拉莫斯顿时沸腾了。所有人都在狂欢，我们开着车到处跑。我坐在一辆吉普车背上敲鼓庆祝胜利。我记得，只有一个人除外，鲍勃·威尔逊，是他把我拉进这个项目的。他坐在那儿，闷闷不乐。我问他："你怎么高兴不起来？"他说："我们造出了一个可怕的东西。"我说："可是，一切都是你牵头的，是你把我们拉进来的。"你知道，对我来说，对我们其他人来说，为了一个正义的事业，我们投身到这项工作中，我们很努力地工作，结果也很圆满，这是一件值得高兴的事，很激动人心。你不再去思考，是的，你停止思考了。在刚开始的时候，你还能思考一些问题，之后就不去想了。所以，他是唯一在那个特殊的时刻还在思考的人。不久，我回到外面的世界，去康奈尔教物理。当时，我有一个很奇怪的念头，我自己也不知道是什么原因，但我那时的感觉很强烈。比如，有一天，我坐在纽约的一个餐馆里，看着外面的建筑，我会想，在广岛爆炸的原子弹，它的破坏半径有多大？能覆盖从这里到第34街的范围吗？所有在这个范围内的建筑，都会被夷为平地。我会想到这些事情。我的想法很奇怪。我在大街上走着，看见人们在造桥，或者在修一条新路，我就会想，他们真是不可理喻，他们不懂，他们就是不懂。（这个世界都快要不存在了）他们为什么还要铺桥修路？这都毫无意义。但幸运的是，我担心的事情在过去的30年里没有发生，不是吗？也许，在接下来的30年里也不会发生。前30年，我认为铺桥修路全无意义，很明显，我错了。我很高兴其他人能够一直往前走。但是，完成原子弹研究工作后，我就是觉得，做什么都是毫无意义的。谢谢诸位。

提问：能不能说说保险柜的故事？

费曼：噢，保险柜的故事有很多。如果你给我10分钟时间，我给你们讲三个故事，怎么样？起初开文件柜、开锁，最后我对所有上了保险的东西都有兴趣。有人教过我怎么开锁。他们给大家配了使用组合密码锁的柜子。我这人有个毛病，这辈子也改不掉，那就是，我总想去解开谜团。每个人都配了那种文件柜，我们的资料就放在里面。那些文件柜上的密码锁—莫斯勒锁具公司生产的密码锁—对我来说是个挑战。到底怎样才能打开这些锁？于是我就整天琢磨它们，研究它们。关于开锁，有很多传奇故事，比如，怎么感知密码，如何听出密码，等等。这都是真的，我能懂，而且领悟很深。但是，这套方法只对老式保险柜起作用。现在他们有了新的办法，在你转动密码盘的时候，没有东西顶着它了。在这里，我就不谈技术细节了。总而言之，所有老办法都失效了。我会去读锁匠们写的书，书里一上来就讲他们怎么擅长开锁，最惊险的故事就是：女人关在保险柜里，保险柜掉进水里，女人快要淹死了，然后他打开了保险柜。就是这些有噱头的故事。书的后面，他就讲自己是怎么做到这一点的，但是他不会告诉你任何真材实料，看起来，他们不可能真的能用那些方法开锁，比如，根据保险柜主人的心理特点猜出密码！我总是猜测，他们可能还是留了一手。不管怎么说，我还是坚持研究。真像是着魔了，我一直死磕这些事情，不肯撒手，直到有了一些发现。首先，我弄清楚了有待破译的密码组合的大致范围，以及怎样去接近这个范围。然后我发明了一套办法，用这套方法，你可以去试所有必须尝试的密码组合。一共有8000种！因为任意两个数字为一组，一共3个组合；而且我发现，只要试5的倍数就可以，也就是说100以内的数字，有20种可能，那么3组密码的可能组合形式有8000种（$20\times20\times20$）。然后我又想出一个方案：保持我设定的一组数字不变，转动密码盘，我可以在8个小时内，试完所有的密码组合。接着，我又有了进一步的发现—这大概花了我两年的时间—你知道，我在那里无事可干，就自己找些事情消遣—最终我发现了一个方法，可以轻轻松松拿到密码，在保险柜开着的时候，密码的最后两组数字是可以找出来的。你拉开抽屉，转动密码盘，就可以看着那根锁栓抬起来，你再转几圈，就可以看到，转到哪个数字锁栓会抬起来，转到另一个数字时锁栓会落下去，等等。用这个小窍门，你就可以拿到一部分密码。我就下功

夫苦练，就像打牌的人练习洗牌一样，一直在练，算得上“拳不离手，曲不离口”。我的动作越来越快，也越来越不露痕迹。我走进一个同事的房间，倚在那人的文件柜上和他闲谈，就像我现在把玩着手表一样，你甚至不会注意到我在做什么。确实，我什么也没干，我就是用手拨弄着密码盘玩，就这样拨弄着。神不知鬼不觉地，我已经把两组密码搞到手了！然后，我回到办公室，赶紧记下那两组数字，三组数字中的后面两组。好了，如果已经知道了后两组数字，那么你只需要一分钟就可以找出第一组数字了，因为只有20种可能。对吧？

就这样，我开锁出了名。他们会来找我：“施穆尔茨（Schmultz）先生出城了，我们想从他的保险柜里拿一份材料。你能打开柜子吗？”我会说：“没问题，我能打开。我去拿工具。”（其实我根本不需要什么工具，）我只需要回到自己的办公室，找一下他保险柜的最后两组密码。我有那两组密码，我知道那里所有人的保险柜的后两组密码，全都存放在办公室里。然后，我拿了一把螺丝刀放在裤子后面的兜里，权当是要用到的工具。到了那个要开保险柜的房间，我会关上门—我的意思是，开保险柜这活儿，不能让大家都学会，因为这会带来安全隐患—如果每个人都知道怎么开保险柜，那就太危险了。关上门以后，我就坐下来，看看杂志，或者做点其他什么事情。一般我会耗上20分钟时间，然后再去开锁，很快就能打开保险柜，一切都很顺利。之后，我再在房间里待上20分钟，让他们觉得开锁并不是一件容易的事情，也给自己挣点好名声。其实，这算不上耍花招，我没耍花招。最后，我走出来，带着点出了些汗的模样，对他们说：“好了，打开啦。你们过来看看。”呵呵。

但是也有一次，情况比较特殊，我完全是靠运气才打开的保险柜，而且它让我名气更大了。那件事情挺轰动的，不过那完全归功于我的运气，与图纸那件事一样，我很走运。战争结束后—我现在可以告诉你们这些事情—战争结束后，我要回洛斯阿拉莫斯把一些论文写完。在那个地方，我又开了好几次保险柜—凭这些事，我可以写一本“开保险柜指南”一类的书，它会比任何一本教人开保险柜的书都要精彩。在书的开头，我会讲述自己如何在不知道组合密码的情况下愣是打开了保险柜，那个保险柜里保存的东西，比任何一个曾经被撬开的保险柜里的东西都要机密。那里存放着原子弹的秘密，关于原子弹的所有秘密，包括方程

式、铀的中子释放率、造一个原子弹需要多少铀，所有的理论，所有的计算，所有关键的资料都在那里！

这件事是这样的：我准备写个报告，而我需要一份材料。那是一个星期六，我还以为大家都上班，就像以前一样。所以我就去图书馆借资料。洛斯阿拉莫斯的图书馆中收藏着所有文件，那些资料就放在一个很大的保险库里，门上装着一个大号的旋钮，样子很奇特。我对这种开关装置一无所知。开文件柜，我很精通，可我仅仅是个开文件柜的行家。此外，保险库前面还有背着枪的守卫在巡视。你不可能把这个保险库打开。对吧？但是，我想了想，有了！老弗雷迪·德霍夫曼（Freddy Dehoffman）在解密部工作，他负责解密文件。现在还有哪些文件需要被解密呢？所以，他不得不频繁地在图书馆和办公室之间来回奔波，这让他又累又烦。后来他想出了一个高明的办法，他把保存在洛斯阿拉莫斯图书馆的每一份文件都做了备份，并把它们放进自己的文件里。他有九个文件柜，一个挨一个放着，塞满了两个房间。那些文件柜里装满了洛斯阿拉莫斯的所有机密文件。我知道他有那些复印件，所以我可以去找德霍夫曼，请他把那份资料借给我。我去他的办公室找他。办公室的门开着，好像他很快就要回来似的；灯还亮着，说明他随时都可能回来。我只好等着。习惯成自然，我一边等着，一边快速转动文件柜上的密码盘。试试10-20-30，不行；试试20-40-60，也不行。所有的组合都试了，我只好在他办公室干等着，无聊透了。然后，我想起了那些开锁匠，我从来都想不通他们是怎样参透人们的心理，从而轻松开锁的，也许他们自己也没有试过，但是，他们关于人们心理的那些说法有可能都是对的。所以，我要试试—运用心理学知识来开锁。要诀第一条，那些书里写着：“秘书很紧张，她害怕自己会忘记密码。”那些数字组合成的密码都告诉了她，可她有可能忘记了密码，老板可能也记不住—她必须清楚这一点。所以，她就会紧张兮兮地把密码记在什么地方。她会写在哪些地方呢？书上列出了秘书有可能记密码的地方。哈哈，最聪明的做法是马上在抽屉里找—拉出抽屉，仔细看看抽屉侧板，在外边，潦草地写着个数字，乍看像是个发票的序号。那就是密码。办公桌边上的抽屉，对吧？我记得书上是这么写的。德霍夫曼的办公桌抽屉锁着，我轻轻松松打开了抽屉的锁。紧接着，我拉开抽屉，在侧板上来回找—什么也没有。好吧，没关系。抽屉里放着很多纸，我在纸堆里翻找着，最终

发现了一张精致的小纸片，上面是希腊字母表，α、β、γ、δ，等等，写得很精心。当这些科学家和秘书说到这些字母时，她们必须会写、会念。对吧？所以，秘书们人手一份这样的字母表。可是—在那希腊字母表的上方，潦草地写着“π＝3.14159”。有情况，她为什么要知道π的数值，不需要她计算什么的呀！于是，我走到文件柜前。书上说的是真的！都是真的！不是吗？简直就像是书里的情节。我只是告诉你们，这问题是怎么解决的。我走向保险柜。31-41-59，不行。13-14-95，不行。95-14-13，也不行。14-31……20分钟过去了，我用π值颠来倒去试着，但是毫无结果。于是，我从德霍夫曼的办公室往外走，这时我想起书上提到的心理学内容，我说，应该是这样！从心理上的角度看，我是对的。德霍夫曼就是那种用数学常数做密码的人。除了π，另一个重要的数学常数是e。于是我又转身走向文件柜，27-18-28，咔嗒，咔嗒，最后再咔嗒一声，文件柜开了。我一路开下去，所有文件柜的密码都是一样的。好了，关于保险柜还有许多故事，但这是其中很精彩的一个故事。时间已经很晚了，我们就用这个故事结束今天的演讲吧。

4　科学文化在现代社会中扮演什么角色？应该扮演什么角色？

这是1964年费曼在意大利的伽利略研讨会上对与会的科学家们发表的一篇演讲。在演讲中，费曼频频表达对伽利略的敬意，并多次提到伽利略的伟大贡献和他曾遭受的极大苦难。费曼主要谈论了科学对宗教、社会和哲学的影响，他还强调我们的质疑能力将决定文明的未来走向。

我是费曼教授，我今天穿得很正式—我一般是穿着衬衫做演讲的，但是今天早晨要离开宾馆房间时，我夫人说：“你必须穿正装。”我说：“可是，我平常都是穿衬衫做演讲。”她说：“我知道。可是，你今天连自己要讲些什么都不知道，所以，你最好给人家留个好印象……”就这样，我穿上这件西装来了。

今天演讲的题目是贝尔纳蒂尼教授18指定的。正式演讲前，我要说明一点，以我个人的观点看，找准科学文化在现代社会的位置，这并不意味着能解决现代社会的问题。现代社会存在大量的问题，但是它们与科学在社会中的地位没有太大关系，一厢情愿认定科学和社会在某个方面应该如何理想匹配，并认为这样就相当于解决了所有社会问题，这种想法不过是痴人说梦。所以，请在座各位理解这一点，虽然我会对如何改善科学和社会的关系提一些建议，但我并不奢望这些改变能解决社会问题。

很多社会问题正在严重威胁着现代社会，我想重点谈谈其中一个问题，它也是今天演讲的中心内容—尽管我还会讲到很多小问题—我要讨论的中心话题是：我认为现代社会最大的一个危险，就是思想控制可能会卷土重来，甚至愈演愈烈，比如在希特勒和斯大林时期，还有中世纪的天主教统治时期。我觉得最大的危险就是这种态势会愈演愈烈，甚至殃及整个世界。

那好，说到科学和社会上的科学文化之间的关系，我们很自然就会想到一件事情，当然也是最显而易见的事情，就是科学的应用。而且，科学服务于社会，这也是一种文化。但是，今天我不打算讨论科学应用这个话题—我这么做，也没有什么特殊原因。我乐于看到这点—在科学服务社会这个问题上，时下流行的讨论话题几乎完全围绕科学的应用而展开，甚至，科学家的一些研究引发的伦理问题，同样也会经常影响技术的应用。可是，我不打算讲这些，因为还有其他一些问题很少被人谈到。另外，为了好玩起见，我想从一个稍微不同的角度来谈谈这些问题。

可是，在科学应用这个话题上，我要说的是—你们都乐于见到科学服务现实生活—科学知识创造了一种力量，一种改造世界的力量：只有当你掌握一定的科学知识后，你才能去做一些事情。但是，科学知识本身没有告诉人们应该怎样利用这种力量—怎样利用它造福人类而不是制造祸端。简而言之，我们没有科学的“使用说明书”，科学应用的实质就是对科学知识的使用进行有效管理，不要让科学给社会带来太多的危害，而是要让它尽最大可能造福社会。但是，有时科学工作者当然会辩称：这不是他们的责任，因为科学应用只代表一种潜在的能量，至于你利用它去做什么，那就是另外一码事情了。但是，在某种意义上，为人类创造这样一种力量肯定是一件好事，尽管人们还需要花费很多心思去想办法—怎样才能控制这种力量，使之造福人类而非荼毒生灵。

我是否还可以这么说，尽管我们在座的很多人都是物理学家，而且大多数人会从物理学的角度去考虑科学可能会带来哪些严重的社会问题，可是我坚信，接下来在学科应用上将要陷入道德困境的那门科学会是生物学。此外，如果说物理学（给人类）带来的是难题，那么生物学发展带来的就是很奇妙的问题了。这种可能性曾经有人撰文暗示过，举个例子来说，赫胥黎19写的《美丽新世界》（Brave New World），但是你们还可以想到更多的例子。比如说，很久以后，用物理学知识可以随心所欲地生产能源；生产食物纯粹就是化学的事情—利用原子本身具有的能量，用一定的方式把原子组合起来。人类制造的废物那么多，人们就可以利用那些物质来生产食物，由于物质守恒的缘故，所谓的粮食问题也就不复存在了。当我们找到控制遗传的办法后，严肃的社会问题

就会出现—比如，我们怎样利用这个技术去控制物种的繁衍，发挥的作用是好还是坏？设想一下，假如我们要去寻找快乐或其他情绪的生理学基础，或是寻找（一个人）雄心勃勃的生理学机制，你可以想象一下，未来我们能够控制一个人的心理，既可以把他变成野心家，也可以让他胸无大志、庸庸碌碌。那么，最终的结局就是整个世界的覆灭。

整个生物学中最引人注目的一点就是生物的死亡必然性得不到验证。如果你说，我们要造永动机，可是通过物理学研究，我们之前发现的很多物理学定律都指出：永动机绝不可能存在—除非这些定律全都错了。但是，在生物学中还没有生物必定死亡的定论。我想，死亡并不是完全不可避免的，生物学家早晚会有所发现，这只是个时间问题而已—他们会找到给我们身体制造麻烦的罪魁祸首，那些可怕的疾病终将被治愈，而人类的肉身也将永恒不朽。总之，你会看到，生物学将给我们的生活带来梦幻般的改变。

现在，我想从一个不同的角度来谈这个问题。

除了科学应用的问题，还有思想层面的问题。思想分为两类，其中一类是科学本身的产物，也就是科学发展带来的世界观的变化。从某些方面看，这是整个科学研究最光彩夺目的那个部分。而有些人会说：“哦，不，科学方法才是最精华的那个部分。”我的看法是，这取决于你看重的是（研究）结果还是（研究）方法，但是科学的研究方法会带来美妙的结果。我不想大谈细节，免得让大家生厌（当然，假如我解释得好的话，你们也不会厌烦）。可是，在座各位都知道科学的神奇—我演讲的对象不是普通大众—所以我不打算讲一些客观事实让你们再次热血沸腾。这些事实不外乎这些内容：我们都是由原子构成的，浩瀚时空的大背景下，我们人类不过是一系列奇妙的生物进化的结果。我们在生物进化进程中的地位—说得透彻一些，尽管我们说自己是万物之灵，其实人类只是生物进化进程的一部分—从这个意义上讲，科学赋予人们的世界观中最了不起的一点就是它的一视同仁（普适性）。整个生物学里最有希望成立的一个假设就是：动物做的任何事情，或者生物的任何行为，都可以从原子的性能这个层面去理解，也就是说，最终以物理定律去解释世间万事万物，而科学家一直以来对这种可能性倾注了很大的热情—到目前为止，还没有什么例外情况出现—对于这种机制是如何运

行的，他们也一再提出自己的设想。因此，我们的知识具有普适性这个事实，其实并没有被人们广泛接受。人们同样不理解的是，现有理论体系如此完整，我们还要费心去寻找不符合这些理论的特殊例子，而且我们发现，要找到这些例子确实很困难—至少在物理学领域是这样—此外，还要耗费巨资使用那些昂贵的设备，而这一切就是为了找到与已知科学原理相悖的例子！然而，关于这个奇妙的世界的描述还有一点很激动人心，那就是天上的星星是由原子构成的，而地上的奶牛和我们人类自己，同样也是由原子构成的，还有，石头也是由原子构成的！

一直以来，我们都想和科学圈外的朋友们介绍这种世界观，但是我们常常会遇到困难，因为他们对基本的科学知识一无所知，而我们却试图向他们介绍最新的科研发现，比如解释CP守恒[20]是什么意思，这反倒让我们自己很困惑。伽利略之后的这400年间，我们一直都在收集关于这个世界的信息，而这些知识是伽利略时代的人们根本无从知晓的信息。现在我们正在做的事情却是大肆挑战现有科学知识体系的边界。那些登在报纸上的科学知识，看似可能激发成年人的想象力，可那些知识往往是成年人不可能理解的，因为他们从未学习过任何基础的科学知识—那些早前科学家发现的、（对科学家们来说）有趣得多的、众所周知的知识。谢天谢地，这种情况还没有发生在孩子们身上—至少在他们长大成人之前。

我要说，我想你们一定也能看到，人们—我说的是普通大众，绝大多数人，绝大多数的大众—他们对于自己所在的这个世界的科学全然懵懂无知，而且丝毫不以此为耻，继续浑浑噩噩过日子，既可悲又可怜。我不是责骂他们，我的意思是他们竟然没有丝毫不安，竟然能够继续这样生活下去—我已经说得很委婉了—因此，每当他们看到报纸上出现CP这些字眼，他们就会问“CP是什么”。这本身就是一个关于科学和现代社会关系的有趣的问题：这么多常识他们都不懂，生活在这个现代社会，他们怎么还能继续无知下去，过得还挺逍遥快活？

附带说一下，在对待知识和奇迹这个问题上，贝尔纳蒂尼先生认为我们应该传授知识，而不是告诉人们会发生奇迹。

知识和奇迹这两个词的意义不同。我认为，我们应该告诉人们会发

生什么样的奇迹，而且传授知识的目的也正是为了更好地理解奇迹。学习知识正是在一个合适的框架内学习大自然的奇迹。不过，他很可能认为我只是在玩一个文字游戏，并把探讨问题转变成去纠结字词的含义。不管怎样，我只是想回答这样一个问题：身处现代社会，为什么这些民众能够一直无知下去，正常生活还不会受到影响？我的回答是：科学（和社会）是脱节的。稍后我会解释一下其中的原因。其实，本来不应该出现这样的情况，而科学（和社会）脱节这种局面是我们自己造成的。我后面会讲到这一点的。

就科学与社会的关系而言，除了科学的应用和一些已经发现的问题，还有其他一些重要的方面也出了问题，这就是科学理念以及科学研究的技巧—你也可以称之为科学研究方法。我很奇怪，人们为什么没能早一点发现这些显而易见的研究方法呢？至于那些简单的理念，只要你试着去用一下，马上能知道它们的好处。也许是因为人类是从动物进化过来的，其心智进化的过程就像人们新发明了一种工具，它还有各种缺陷，用起来也不是很顺手。人类特有的心智有缺陷—其中一点就是它会被自己的迷信思想蒙蔽和迷惑。科学方法的发现最终为它找到了一条出路，使其能够反映客观世界，这样科学家才能朝某个研究方向迈出一小步，取得些许的进步，而不是一直兜圈子、止步不前。我觉得，今天在这里探讨这个问题非常应景，正是伽利略开启了这种科学新发现的先河。当然，你们都知道这些科学理念和方法。接下来我要做个回顾—同样地，这些内容也需要你们详细讲解，因为你面对的是不从事科学研究的普通民众。但在这里，我只是简单提一下，大家也就知道我要重点谈论哪些问题了。

第一件事是检验证据—呃，第一件事应该是：一开始你肯定是不知道答案的。也就是说，你开始工作的时候并不知道答案是什么。这一点非常、非常重要，重要到我要再多花些时间、深入谈谈这个话题。一开始的时候，你面对的问题必须是有疑问的、不确定的，如果你已经知道了答案，那就没有必要去收集任何证据了。首先是有一个不确定的问题，下一步就是寻找证据，科学的方法是先做试验。但是也不能忽视另外一个非常重要的方法，一个很关键的方法，那就是把所有的想法放在一起，然后尝试在你所知的这些事情里找到一种内在的逻辑联系。把你

知道的所有事情联系起来，看看它们是否有内在联系，这种做法很有用处。找出不同的事物之间的内在一致性，这种尝试越多，得到的结果越好。

证据收集上来后，接下来就是检验工作，而做这项工作有个惯例：不能只挑选自己喜欢的证据，而是要考虑所有证据，要做到客观对待—足以让检验工作进行下去—也不能完全依靠权威理论。权威理论或许可以提供一些帮助，帮助我们找到问题的真正答案，但是它不能提供检验工作所需的信息。因此，在可能的情况下，当观察到的情况与权威理论不一致时，我们就可以不理会那些权威理论。最后，应该客观公正地记录这些结果。客观公正这个颇有意思的词总会困扰我—因为这意味着在一个人做完所有这些事情之后，他不能任意改动结果，但这不是最重要的。这里客观公正的意思是：你汇报的那些内容不能影响读者的判断，要避免与证据显示的情况有出入。

我想你们都理解我说的这些。

所有这些做法、所有这些思想和所有这些研究方法，都根植在伽利略的精神之中。我们在这里正庆祝伽利略的诞辰，我们说的这些观察事物的方法，其发展和传播离不开他的贡献，最重要的是，他向我们展示了这些方法的力量。不论是在任何一个百年诞辰纪念日，或是400年诞辰纪念日，总有一天人们会这么想：如果这个人现在就站在这里，我们带他看看现在的这个世界，那么，他会说些什么呢？当然，你们会说，这种陈词滥调，你不应该在演讲时提这个。但是，我接下来就要说说这个事情。假设伽利略现在就站在这里，我们向他介绍当今这个世界的现状，我们想努力让他高兴，或者想知道他的看法。我们会告诉他这些：我们如何对待证据，以及他开创的那些判断事物的方法在当今运用的情况。我们也会告诉他，我们依然忠实恪守他的那一套做法—这已经是科学工作的传统了—这甚至体现在一些具体做法上，比如数值测量等，它们现在还是很好的研究工具，至少在物理学领域是这样。还有，现代科学直接从他的科学思想和科学精神中汲取营养，一直在蓬勃发展。而科学发展的结果，就是如今不会再有巫婆和鬼魂了。

确实，我说定量研究对科学非常有帮助，但是，这里有一个对科学

的定义问题。伽利略曾经为之殚思竭虑、呕心沥血的那些学科，如物理学和力学等，现在无疑已经发展得很好了，此外，这些方法也推动了生物学、历史学、地理学和人类学等学科的发展。正是借助这些研究方法，我们了解了很多人类的历史和动物的历史，还有地球的历史。同样的研究体系还应用于经济学，从而也推动了该学科的发展—由于一些现实困难，其作用发挥不是很彻底。但是，在某些领域，人们并没有认真对待这种研究方法，只是嘴上说自己做了定量研究，可是很多人只是走个过场而已。把这些情况告诉伽利略先生，我会感到很羞愧，但是这就是实情，比如在社会科学领域，定量研究确实做得不好。拿我个人的经历为例—正如大家所知，对于教学方法的研究，尤其是算术的教学，目前有一箩筐的研究，但是如果你想找出大家都认可的说法，即“某种算术教学法比其他方法要好”，你会发现，虽然有不计其数的研究和大量的统计数据，但是它们根本不成体系、各说各话，所谓的研究不过是拼凑了一些趣闻逸事，完全不去控制变量的实验和变量控制得很差劲的实验罢了，其“研究”结果几乎没有什么有价值的信息。

最后，我想请伽利略看看我们现在的世界，我必须让他看一些东西，虽然这样做会让我备感羞愧。如果我们把目光从科学转到身边的世界，我们就会发现一些很遗憾的事情：我们生活的这个地方迷信思想大行其道，比比皆是。伽利略会说了：“我观察过的，木星（Jupiter，以罗马神话中的众神之王朱庇特命名）是一个拥有好几个卫星的星球，它不是什么天神。有没有人告诉我，占星师到底是怎么回事？”他们把占卜结果印在报纸上，至少在美国是这样，每天各种日报都会刊登他们的占卜结果。时至今日，占星师为什么还有市场？怎么还会有人写这样的书，比如《冲突的世界》（Worlds in Collision）这本书，那个作者的名字是以“V”开头的，这是个俄国名字吧？什么？叫Vininkowski[21]？这书怎么还成了畅销书？那些和玛丽·布罗迪（Mary Brody）有关的胡扯究竟是怎么回事？我不知道，那都是些荒唐可笑的东西。这个世界总有数不胜数的荒唐事情。换句话说，我们生活的这个地方迷信思想大行其道，比比皆是。现在还有人在谈论心灵感应，尽管它快要没有市场了。信仰治疗也是日嚣尘上，影响很广，他们还有一全套宗教理论。据说法国的卢尔德[22]出现过圣迹，人们一直去那里朝圣，期望治愈疾病。这样看来，占星术的那套东西也许是对的。某一天火星和金星处于一定的角

度，你挑那一天去看牙，也许比其他日子疗效更好。也许卢尔德的圣迹真的能够治好你的病。但是有一点大家要注意，如果那是真的，我们就应该展开调查。为什么呢？为了提高疗效呀。如果那是真的，也许我们能够发现星相是否真的会影响人生，通过统计调查，通过科学、客观和仔细地检验证据，我们也许可以提升整个“治疗”体系的效力。假如在卢尔德接受治疗果真有效，那么就有一个问题：病人应该站在离圣迹多远的地方才有最佳疗效呢？他们是否操作不当，以至于灵力对站在后面的人没有发挥作用？又或者，那个地方这么灵验，圣迹边上是否还有大量的空间可以安排更多的人？又或者，是否有这种可能性，和圣人接触能治好病—最近在美国不少人被推崇为圣人—其中一个圣人没有触碰患者就治好了那人的白血病，看来是用来连接病人床单的缎带提高了治愈白血病的概率（此前缎带接触过那个圣人的一些物件）。现在的问题是，缎带的灵力会不会渐渐消退？你们听了可能会发笑，但是，如果你坚信信仰治疗这事是真的，那么你就有责任去做调查研究，努力提高它的疗效，让接受治疗的人都能满意而归，而不是让它沦为骗人的伎俩。比如说，假如事实证明，那根缎带在使用一百次后就不再起作用。当然，调查结果也有可能是其他结果，也就是说，这件事根本就是子虚乌有的！

我要提一下困扰我的另一件事，那就是，现代的神学家们竟然能够煞有介事地探讨一些事情，而丝毫不感到羞耻。他们可以探讨很多问题而不会感到羞愧，但是他们在宗教研讨会上讨论的一些事情，以及必须（经过讨论）得出的所谓结论，身处现代社会，这些事情着实荒唐可笑。我要解释的是，（改变现状）面临的一个困难，也就是这种现状得以持续下去的一个原因，是人们没有意识到，这些事情中哪怕只有一件事被证实是真的，那就会颠覆我们的世界观。如果你能够证明这是真的—无须证明整个占星术是确凿可信的，只需要证明其中的一丁点儿说法—这就会极大影响我们对整个世界的理解。刚才大家都笑了，因为我们坚信自己对世界的理解是对的，那些说法肯定影响不了我们。从另一方面看，我们为什么不能清除这些观念呢？可能一时还做不到这一点，我稍后会解释原因—我前面也说过，科学与占星术各不相干（上文提过“科学和社会脱节”—译者）。

接着，我再谈谈一件事情—虽然还有争议，但是我仍然相信这一点

—在检验证据和报告证据以及诸如此类的事情时，科学家们应该对同行负有某种责任，你也可以称之为一种科学职业道德。怎样提交研究结果才是正确的呢？哪些做法又是错误的呢？那就要求做到客观真实，这样别人才有可能准确理解你的研究报告，这样他们才会尽可能不受你的偏好影响。这一点非常有意义，它可以帮助我们理解对方的想法。我们做研究，不是出于个人的利益，而是为了推动整个思想观念的进步—事实上，这是一件很有意义的事。所以，你得承认，这是科学研究的一种职业道德。我认为，更多的科学家应该具备这种职业道德—虽然明知现实情况不大乐观。这种想法，这样一种科学职业道德，一旦沦为“（政治）宣传”的工具，可能就不是什么褒义词了。一个国家任由另一个国家去评说，还要求做到公道、不偏不倚，这是怎样一种怪状啊—简直比卢尔德的圣迹还要匪夷所思！广告就是一个例子，它对产品的描述极尽渲染之能事，既不科学也不道德。这种无视科学道德的情况可谓泛滥成灾，而人们对此已经司空见惯，最后也不觉得这是一件坏事。所以我想，要加强科学家和大众联系的一个重要原因，就是要担负起科普的责任，也就是唤醒他们的科学意识，不能任由民众总是无知无觉，或是容易听信一些哗众取宠的言论，那会对民众的心智造成永久性的损伤。

科学的方法对另外一些事也有帮助，那些事情很清楚明了，却变得越来越难以商讨—比如做决策。我并不是说应该利用科学计算工具做决策—像美国的兰德公司23那样埋头计算。这让我想起大学二年级在我们谈论女人的时候，发现用电学的术语—比如阻抗、磁阻和电阻—就能把事情看得更透彻一些。当今世界另外一件让科学家胆战心惊的事情，是一个国家选领导人的方式—每一个国家都不例外。举个例子，当今美国的两大政党都会聘请公关专家，也就是职业广告人。这些人训练有素，为了达到某个目的，他们知道什么时候必须说真话、哪些场合应该撒谎。这已经背离了选举的初衷。他们本来应该去指点江山，而不光是绞尽脑汁想政治口号。而事实上，如果你回顾一下美国历史，尽管时局不同，但是很多政治人物都要靠政治口号才能当选。（我敢肯定一点，现在两大政党在银行都存了上百万美元的专项资金，所以，到时各自亮出一些轻易俘获民心的选举口号自然不在话下）。但是，现在我没有办法提供一个经过完全统计后的数据。

我一直都在说科学（和占星术）是“各不相干”。这听起来有些奇怪，我想再回到这个话题。科学当然和占星术有关联，（研究对象一致）—而基于我们对这个世界的理解，我们无法理解占星术何以受大众追捧—所以在一点上，两者是有关联的。但是，对于那些信奉占星术的人来说，科学和他们没有什么关系，因为科学家从来不屑于跟他们辩论这些话题。至于信仰治疗的追随者，他们也根本不必担心科学来挑战他们相信的那一套，因为没有科学家会特意来砸场子。如果你不喜欢科学，你大可不必去学。如果你觉得学习科学知识太费脑子—对一般人来说，确实如此—你完全可以把它置之脑后。为什么人们会把科学置之脑后呢？那是因为，我们科学家还没有行动起来。我认为，我们必须讨伐那些我们科学家们不相信的事情。我们不会动用砍头这种方式，而是要发起大辩论。我觉得，应该是时候要求人们开动脑子了，他们对这个世界的认知应该更加完整，而不应该随波逐流，什么奇怪的说法都全盘接受，更有甚者，脑子里同时装着两种对立的看法，却不肯稍微动脑子去认真想一想—那是对人类大脑的浪费。因为我们知道，如果我们把自己脑子里所有的观点都摆在一起，一一对比和相互印证，这样就会更加明白自己的处境以及“我们是谁”这个问题。科学之所以到今天还“置身事外”，我认为原因就在于：我们一直不主动去做科普工作，一直等到别人向我们请教，才开口解释一些问题，结果等到现在，有人邀请我们去讲讲爱因斯坦的理论，结果却发现听众是一些连牛顿力学都不懂的人！但是，从来没有人邀请我们去抨击一下信仰治疗或占星术—有没有人邀请我们去讲讲“当今如何以科学的眼光看待占星术”？

我想，我们科学家需要做的，主要是写一些文章。那会有什么效果呢？这样会制造一个社会大辩论的氛围。相信占星术的人就需要去学点天文学，而相信信仰疗法的人，可能就不得不去学一点医学和生物学知识。换句话说，要让科学和它们产生联系，就必然这么做。我曾经看到这样一句话：科学只要不攻击宗教，一切都好说。这句话启发了我，这让我意识到科学游离于大众之外这个问题的严重性。（照那个思路，）只要科学不攻击宗教，人们就不会去关注它，也就没有人会去学习一些科学知识。这样一来，除了科学的一些应用，科学和现代社会就没有什么联系了，乏人问津。而我们的处境就很尴尬，拼命向人们解释一些他们不想去了解的东西。但是，如果他们想为自己的观点辩护，那么，他

们就不得不学一点点你的东西。所以我想提醒诸位—也许我这个想法不对，或者根本就是错的—我们过于礼让了。历史上有段时期，人们曾经辩论过这些问题。那时候，教廷觉得伽利略的观点是对教廷的攻击，而现在，教廷觉得当今的科学观点对他们没有什么威胁。没有人把科学视为心头大患，没有人对不科学的“理论”发起攻击。我是说，没人撰写文章，指出当今人们信奉的神学和科学矛盾的地方—更不用说，有些科学家连自己的宗教信仰和从事的科学工作之间的矛盾都无从处理。

接下来的问题，也是我今天要谈的最后一个重要的问题，确实也是我认为最重要、最严肃的主题，那就是科学的不确定性和质疑精神。科学家从来不会说很绝对的话，我们都知道这一点。还有，我们说的话都是留有余地的—只是对事情确定的程度不同而已。我们陈述一件事情时，不是判断它到底是对是错，而是它正确或错误到什么程度。“上帝存在吗？”“如果要用疑问句，要问（上帝存在的）可能性有多大？”这种问法的改变让宗教人士很不安，而这正是宗教说法不科学的原因。我们必须在一个许可的不确定的范围内探讨每一个问题；更多的证据也许会提高某个观点正确的可能性，或者刚好相反。但是科学绝不会断言一种说法绝对正确或绝对错误。现在，我们都知道了，为了推动科学进步，坚持这一点是至关重要的。就质疑精神而言，我们下结论绝对要留有一定的空间，否则就没有（科学）进步，没有（个人的）长进。提不出问题就难以有长进，而提问题需要有质疑精神。人们想寻找一个绝对的结论—就像板上钉钉那样，可是没有这么确定的结论。因此，人们感到恐慌—什么都不确定，那你怎么活下去啊？其实这一点儿也不奇怪，你只是觉得自己明白所有这些事情。事实上，你做的大多数事情都是基于不完全的认知，你并不知道它们到底是怎样回事，或者世界存在的终极意义，还有其他很多事你也未必知道多少。懵懵懂懂地活着，这好像就是实际情况。

质疑精神对于自然科学的发展至为关键—它在人们与教廷的不断抗争中诞生，那时的教廷拥有绝对的权威，它提供各种问题的答案。伽利略是那场抗争的代表人物，他是最著名的斗士。虽说后来伽利略被迫宣布放弃自己的想法并公开忏悔，但是没有人把这个当回事。现在我们不用走伽利略的老路了，没人逼我们公开忏悔，宣布放弃自己的想法。事

实上，我们认为这种做法很愚蠢—而在那个历史时期，教会一再要求人们做这种愚蠢的事情。我们很同情伽利略，还有苏联时期有同样遭遇的音乐家和画家。庆幸的是，这种事情近年来变少了。其实，这种公开忏悔毫无意义，不管那些人怎样精心地来谋划。在外人看来，很明显，这种事情根本无足轻重。在介绍伽利略的时候，他的忏悔无须花费时间去讨论—那只不过说明“伽利略上了年纪，而教会势力很强大”。伽利略的理论是正确的，这个事实我们不用多说，而教廷一直试图迫害他，这个才是我们要讨论的重点。

就人类的潜能而言，到目前为止，我们人类在这个星球取得的成就显得如此之少，这让我们所有人感到沮丧。过去的人们—即便他们所处的那个时代是个噩梦，他们都曾经憧憬过未来。现在，他们梦想的那个未来看似已经实现了，而且在很多方面已经超越了原来的梦想，然而在更多的方面，今天我们的很多梦想还是之前人们的梦想。以前，人们曾经对这种或那种解决问题的办法寄予厚望，其中一个办法就是教育的普及—这样一来，人人都可以成为伏尔泰，我们就可以解决所有的问题了。教育普及也许是件好事，但是其结果可能有好有坏—你教给学生的可能是真理，也有可能是谬论。随着科学技术的发展，不同国家之间的沟通交流日益便捷，照理说，这肯定能够改善国家之间的关系。但是，这取决于你沟通的内容是什么—它可能是真实情况，也有可能是虚假情报；既有可能对别国进行威胁，也有可能传达善意。人们曾经强烈渴望科学能够帮助人类摆脱病痛折磨，特别是药物，好像科学家研制出来的都是灵丹妙药。有时情况确实如此，但是，我们此时此刻在这儿谈论这些问题，与此同时，有些科学家可能正躲在某个隐秘的实验室里，使尽浑身解数制造别人束手无策的病毒。今天我们也许都有这样一个梦想，认为社会全员实现经济富足就能解决一切问题。我也认为，每个人都应该拥有足够的物质财富。当然，我不会说这个目标不值得我们去努力。我说这些话，并不是说我们不应该大力发展教育，或是不应该加强交流，也不是说我们不应该追求富足的物质生活。但是，假如说靠它们就能解决这个社会的一切问题，那就值得商榷了。因为在那些经济相当发达的地区，出现了一大堆的新问题，也有可能就是那些老问题，只不过稍稍改头换面了一下—如果我们恰好对相关历史有足够了解的话。

现在我们还不是很富足，我们也没有觉得自己已经做得够好了。人们，各个时代的哲学家，一直在努力揭示生命的奥秘，生命所有的意义。因为如果我们能够发现生命的真正意义，那么我们人类所有的努力，所有奇妙而巨大的潜能，就都可以朝着一个正确的方向共同努力，这样我们就可以大步前进，取得重大胜利。因此，我们尝试用很多不同的理念去看待这个世界。但是有一个问题—整个世界的意义、生命的意义和全体人类的意义等，无数人曾经无数次回答过这个问题。但是，得出的答案都各不相同。持某种看法的人的所作所为，在持有另一种看法的人那里激起的反应是恐慌—因为他们眼睁睁地看着可怕的事情发生了：另一群人在自己对这个世界僵化的看法驱使下生生被推进了死胡同。事实上，可能正是出于这些惊魂经历，人们才看清人类的潜力竟是如此巨大。可能也是这个想法给了我们希望：假如我们能够把这股强大的力量引上正确的道路，世界就会变得美好得多。

那么，整个世界的意义何在？我们还不知道生命的意义。通过研究现有的所有观点，我们得出的结论是：我们并不知道生命的意义。但是，就在坦陈这个事实的同时，我们或许已经找到了一个突破口—在前进的道路上，只有当我们承认自己无知时，才有可能给其他想法一个机会。这样我们就不会死死抱定某些事实、某些知识和“绝对真理”不放，而是一直坚持“一切不确定”的态度—也就是说，我们会“冒个险”。英国人就是用这种方式完善了他们的政府，他们称之为“勉强应付着来”。尽管看起来相当笨拙，但是这确实是实现进步的最科学的方式。根据已定的答案来做决策，这是不科学的。要取得进步，你必须给未知领域留一些空间—仅仅是留一些空间。我们人类还处在发展的最初阶段，人类心智的发展还刚刚开始，未来要走的路还很长很长。我们不能现在就给出所有问题的答案，我们也不能把所有的人都赶向一个方向，还对他们说“这就是终极的解决方案”。守住这条底线，这是我们科学家的职责所在。否则，我们就会被人类目前有限的想象牢牢困住。我们只能做一些我们现在看来应该做的事情。如果我们总是能留一些空间供大家质疑和讨论，并在一条接近科学探索的道路上坚持前行，那样就不会陷于思想被束缚的困境。虽然，现在的情况并非如此，可是我相信这一天总会到来。我希望，到那时候，人们都会深刻意识到：政府的权力应该受到约束，政府没有权力裁定某些科学理论是否是正确的—政府试图这么做，

这是很可笑的事情—他们没有权力决定历史该如何书写，也没有权力左右经济学理论或哲学理论。只有这样，未来的人类才真正有可能得到充分的发展。

5　底下还有大量的空间—对纳米技术的展望

1959年12月29日，“纳米技术之父”费曼在加州理工学院召开的美国物理学会大会上发表了这个著名的演讲。在演讲中，费曼阐释了微缩技术的前景—这个想法比他所在的时代超前数十年：即如何把整套《不列颠百科全书》的内容装在一根针头大小的容器里，将生命体和非生命体的尺寸急剧缩小，以及极小型机器润滑的问题—这种机器比这句话结尾处的句号还要小。费曼还设了一个大擂台，他向年轻的科学家挑战，看他们能否制造出一个能正常工作的电动机，其各面的边长不超过 1/64英寸（0.4毫米）。

来自物理研究新领域的邀请函

我想，实验物理学家一定会羡慕卡默林·翁内斯[24]那样的人。他发现了低温研究领域，而这个领域似乎是没有“底儿”的，可以让人一直不停地向下探索。因此，他成了这个领域的研究带头人，在一段时间里，可以说是独领风骚。而珀西·布里奇曼[25]发明了一个方法获得了超高压，从此开辟了一个新的研究领域。他不仅自己向这个领域进军，还带领我们一路前行。同样地，对高真空的研究也是一个有待深入研究的领域。

我想介绍一个领域，虽然目前研究成果不多，但是在理论上大有可为。这个领域和其他领域不大一样，它不会去探讨物理学的诸多基本问题（比如“奇异粒子”是什么？等等），从某种意义上讲，它比较接近固态物理学—它研究的是复杂情况下发生的一些很有意思的奇怪现象。最重要的是，它有异常广阔的应用前景。

我要谈的就是微观世界的操控技术。

只要我谈到这个问题，马上就会有人告诉我微型技术及其最近的发展有多神速。他们跟我提起只有小拇指指甲大小的电动马达，他们还告诉我市面上已经出现一种设备—你可以在大头针的针头大小的面积里“写”下主祷文。但是这些都不算什么。就我要讨论的问题而言，这些只是这个研究领域最初级、最不成熟的技术。深挖下去，那里还有一个极其微小的世界。到了2000年，那时的人们如果回头看我们这个时代，他们会感到很困惑：为什么直到1960年才有人认真研究这个领域？

我们为什么不能把全套24卷的《不列颠百科全书》的内容写在大头针的针头大小的面积上呢？

首先我们来看看，这会涉及哪些问题。大头针针头的直径是1/16英寸（约1.6毫米），如果把针头的直径放大25000倍，它的面积就相当于全套《不列颠百科全书》所有页面的面积总和。因此，我们要做的只是把《不列颠百科全书》上的文字缩小到原来的1/25000。这样做可行吗？我们肉眼的分辨能力大约是1/120英寸（约0.2毫米）—大约是《不

列颠百科全书》一个印刷网点的直径。如果把这个点缩小到原来的1/25000，它的直径就是80埃[26]，相当于32个普通金属原子一字排开的长度。换句话说，这个点可以容纳大约1000个原子。这样的每一点都可以很容易依据照相凸版印刷的要求调节大小，因此大头针针头有足够的空间刻写全套《不列颠百科全书》，这么做是没有问题的。

另外，如果文字可以被这样刻写的话，就一定有方法把它们读出来。我们假设用凸起的金属字刻写，也就是说，《不列颠百科全书》的文字被缩小到原来的1/25000之后，并一一用凸起的金属字刻写下来，那么，（将来印刷出来）黑色部分就是《不列颠百科全书》的正文内容。那么要怎么把它们读出来呢？

如果能用这种方式刻写文字，我们也可以利用当今常用的技术把它们读出来（假如我们真的能这样刻写文字，将来一定会有人想出更好的方法把这些文字读出来，但是为了保险起见，我就讲讲现在我们能理解的技术）。我们可以这样做：（1）把金属字压进塑性材料，做好模子；（2）小心翼翼地把塑料模子撕下来；（3）把硅蒸镀到模子上，形成一层很薄的硅膜；（4）拿黄金再蒸镀一层膜，从特定的角度把黄金蒸镀到硅膜上，这样会让所有的微型文字更清楚地呈现出来；（5）最后融掉塑料膜子，使其从硅膜上剥离，这样我们就可以用电子显微镜来阅读了！

因此，把缩小到原来的1/25000的文字以凸刻的方式刻写在大头针头上，用今天的技术就能很容易把这些文字读出来。另外，我们还发现拷贝也非常容易：只要把金属字板再次压进塑性材料里，我们就可以得到另外一个拷贝了。

如何刻写微型文字

下一个问题就是：我们怎么去刻写这么小的字？我们现在还没有完成这个步骤的标准技术。但是我要说，这件事情并非乍看那么困难。我们可以把电子显微镜的镜头翻转过来，把原来的放大功能变成缩小功能。让一束离子通过这种翻转的镜头，最后聚焦成一个非常小的点。就像电视机示波器的阴极射线管的工作原理那样，我们可以用那个点来“书写”：一行一行地把离子打上去，并且在这一过程中，调整将要贴附在表面的离子的数量。

由于空间电荷的限制，使用这个方法“书写”可能很慢。以后会有更快捷的方法—可能利用照片成像的原理，我们可以先做一个布满小孔的屏幕，小孔设计成文字的形状；然后我们在屏幕后激发电弧，使金属离子穿过屏幕上的小孔；接着使用上述那套已经翻转过来的镜头，使这些离子构成一个个小图像—也就是文字，而这些金属离子会贴附在大头针针头的金属表面上。

另外有一个比较简单的方法（不过我还不确定这方法是否可行）：

我们可以把光学显微镜的镜头倒转过来，让光线通过镜头聚焦到一块很小的光电屏幕上，屏幕上被光线照射到的地方就会有电子被打出来，这些电子通过电子显微镜的镜头被聚焦，接着就直接打在金属表面（也就是大头针的针头）。如果在这一过程中，电子束经过的距离太长，它还能不能在金属表面上留下刻痕？我不能肯定。如果它在金属表面不能留下刻痕，我们肯定能够找到某种特殊材料覆在针头表面，一旦承受电子束撞击，该材料表面一定会留下印记，之后我们也可以辨认出来。

这些装置不存在强度不足的问题—利用电子显微镜“放大”的时候经常会遇到这个问题，那种情况下一般只有少量电子，要把它们“放大”后打到很大很大的一块屏幕上，现在的情况恰恰相反。一整页的光线被聚焦在一块非常小的区域，因此光的强度非常大。而光电屏幕出来的少数电子也会被聚焦到非常小的一个区域，因此其强度也是非常之大。我真是搞不明白，为什么到目前为止还没有人去做这件事！

刚刚我们说的是把《不列颠百科全书》搬到大头针针头上。现在让我们考虑一下，怎样把全世界所有的书都装进去。美国国会图书馆大约有900万册藏书，大英博物馆的图书馆里有500万册藏书，法国国家图书馆的藏书也有500万册。当然，这些藏书可能会有一部分是重复的。我们就假设世界上总共有2400万册重要书籍。

假使用上述尺寸把所有这些书籍都印下来，那会出现什么状况呢？又会用掉多少空间呢？显然，这下需要的面积相当于100万个针头的面积总和，因为原来我们只是印24册，这回却要印2400万册。这100万个针头可以摆成一个正方形，边长是1000个针头的宽度，那么它的面积是3平方码（约2.5平方米）。这也就是说，我们用硅膜—之前我们拿它做过拷贝，其背衬是纸张厚薄的塑料—记录所有这些书籍内容，需要的总面积大约等于35页《不列颠百科全书》的页面面积之和，这相当于这份杂志一半的版面面积。这就意味着记录人类文明的所有信息可以放进一本小册子，而你可以随身携带这个小册子。而且这小册子用的还不是代码，只是微缩了书上的原件相片和版画等等，一点儿也不失真。

如果我对我们加州理工学院的图书管理员（现在她穿梭于一座座图书馆建筑之间）说，10年后，所有她努力保管的书面信息，包括从地板堆到天花板的12万册书籍、一抽屉一抽屉的图书卡片，以及塞满储藏室的旧书，所有这些都可以放在一张图书借阅卡大小的卡片里，不知道她会做何反应。我们假设说，巴西大学的图书馆遭遇火灾，所有藏书付之一炬，我们就可以把我们图书馆中所有的藏书拷贝一份，给他们寄过去—只要用我们的藏书母版制作一份拷贝，花费时间不过数小时，然后用航空信寄走，而且用的信封不会比普通航空信件大，重量也不会比一般信件更重。

今天我演讲的题目是“底下还有大量的空间”，而不只是“底下还有空间”。我刚才已经论证了“确实有空间”—你可以用切实的方法缩小尺寸。现在我要说明的是有大量的空间。我不打算探讨具体做法，只是想谈谈原则上有哪些可能性—也就是说，按照物理学的原理，哪些事情是可能的。我并不打算提出什么“反重力”概念—只有在现有物理定律被颠覆的情况下，这才有可能。我要告诉你们的是：在确定现有物理学正确的前提下，我们能做到的事情，而我们现在之所以没有做到，那只是因为我

们还没有摸到门道。

微型世界的信息

假设一下，我们不是直接去拷贝照片和所有资料，而用点和画的不同组合—或者还有其他类似的符号—代表不同的字母。每个字母包含6比特或7比特的信息，也就是一个字母用6或7个点或画表示。请注意，之前我只提到把所有文字写到针头的表面上，现在我还要研究文字的内部构成。

如果我们用一种金属的一个小粒代表点，相邻的画则用另一种金属的一个小粒来代表，如此类推下去。我们持保守态度，假设储存一个比特的信息需要一个小立方体，大小为5×5×5个原子—也就是需要125个原子。我们需要用100个原子和其他一些原子，以此确保信息在传播或其他过程中不会遗失。

我曾经估算过《不列颠百科全书》里全部字母的数量，假设2400万册图书都跟《不列颠百科全书》一般大小，那么总共大约需要1015个比特。假设每个比特用100个原子来表示，那么人类精心积累下来并写进书本的知识，全部可以储存在一个边长为1/200英寸（0.127毫米）的立方体里，其大小是我们肉眼勉强可看到的灰尘那么大。所以我说其实还有大量的空间可以利用！拜托，你们不用跟我提什么微缩胶卷！

大量的信息可以被存储在极小的空间里—当然，生物学家早知道这个情况，而且在我们能理解这一切之前，这个事实也解答了一个疑团，那就是：构成复杂的生物—比如说我们—的所有生物学信息是如何被保存在一个哪怕是最小的细胞里的呢？那些生物学信息包括我们的眼睛是不是棕色的，我们到底有没有思考能力，或者在胚胎时期下颌骨开始发育，边上就会有一个小洞，以后供一条神经穿过，等等—这些信息都被储存在一条长长的DNA分子链里，而这个DNA分子链只是一个细胞里很微不足道的一个部分，在这里，大约50个原子可以代表细胞内1个比特的信息。

我们需要更好的电子显微镜

如果我写代码时，用一个小立方体—5×5×5的原子—代表每一个比特，那么有一个问题：怎么把它读出来？现在的电子显微镜性能还不够好，即便再努力、再仔细观察，它也只能看到10埃的东西。我谈这些微观世界的东西，就是想努力让你们知道，把电子显微镜的性能提高100倍有多重要。然而这并不是不可能的事情，这也不违背电子衍射原理。透过这种改进后的电子显微镜，电子的波长只有1埃的1/20。因此，用这种显微镜有可能观察到单个原子。能清晰地看到单个的原子，这该有多好啊！

在其他领域，比如说生物学，我们也有认识的朋友。我们物理学家会常常对他们说："你知道自己的研究进展不快的原因吗？"（实际上，我不知道当今有哪个学科的发展比生物学还要快。）"你们应该像我们一样，多使用数学。"他们原本可以这样回答，但是他们很礼貌，我来替他们说："如果想让我们加快进度，那么你们首先应该把电子显微镜性能提高100倍。"

当今生物学最核心、最基本的问题是什么？是下列这些问题：DNA的碱基序列是什么样的？基因突变时会出现什么状况？DNA的碱基序列和蛋白质中氨基酸的序列有什么联系？RNA的结构是什么样的，是单链长分子还是双链结构，它跟DNA的碱基序列又是什么样的联系？微粒体是怎么构成的？蛋白质是怎样合成的？RNA跑到哪里去？它如何固着？蛋白质固着在哪里？氨基酸又会进到哪里？在光合作用中，叶绿素在哪里，它是怎么排列的，类胡萝卜素在其中起作用吗？光转换成化学能机制是什么？

生物学的这些基本问题大多很容易回答—你只要去看那些东西就行了。你会看到分子链上碱基的序列，你还会看到微粒体的结构。不尽如人意的是，透过现在的显微镜，我们看到的图像不那么清晰。把电子显微镜性能提高100倍，很多生物学的问题很可能就迎刃而解了。我这么说，可能有点夸张，可是，一旦做到这件事情，生物学家一定会很感激你的—而且，比起他们在研究上应该多用数学那个建议，他们会更欢迎

这个变化。

当今化学反应的理论是建立在理论物理的基础上的。从这个意义上讲，物理为化学提供了理论基础。但是，化学这门学科还包括化学分析。如果你拿到一个奇怪的物质，你想知道它到底是什么，那就要经过漫长复杂的化学分析才能得到结论。到今天，你几乎可以分析任何东西的成分。所以，我说这些，也不是什么先见之明。但是如果物理学家想做成分分析，他们的研究可以比化学家更进一步。对他们来说，分析任何一种复杂的物质，这可以是一件非常简单的事：只需要看看它的原子在哪儿。问题是现在的电子显微镜太差劲了。（等会儿我要问一个问题：物理学家能否针对化学的第三个问题，即物质合成，做点事情？有没有物理方法来合成任何一种化学物？）

电子显微镜这么差劲的原因是镜头的 f 值只有1/1000，这种数值的孔径就不够大。我知道，有理论证明：轴对称静磁场的镜头，它的 f 值不可能超过某一个值，因此现在电子显微镜的分辨率已经达到了理论极限。但是，任何理论都有假设。为什么磁场必须是对称的？我向大家提一个问题：难道没有办法提高电子显微镜的性能吗？

神奇的生物系统

生物信息可以“写”在极小的空间内，生物学的这个例子启发了我：也许做一件事情是可能的。生物学上的这个例子，不仅仅是“写”下信息，还在“做”有关的事情。一个生物系统可以无限小。很多细胞都很小，却非常活跃：它们生成各种各样的物质，它们到处游走，它们摇摆不定，它们能做很多神奇的事情—所有这些活动都在极小的空间内完成。此外，它们还储存信息。我们考虑一下这件事有没有可能：制造一个能完成我们指令的很小的机器，这种机器可以在上述极小的空间内活动！

制造很小的机器还有经济上的好处。我想请各位注意一下计算机的这些问题。我们要在计算机里储存海量信息。我前面提到的那种做法，用金属分子记录信息的方法，是永久性的（不能修改）。应用到计算机上，更实用的一种方法是可写、可擦除，然后可以再写上其他的东西。（通常我们不想浪费用来写东西的材料。但是，如果我们可以把信息写在极小的空间里，问题就不大了，读取完信息之后就可以把它丢掉了。这种材料的损耗也不会太费钱。）

计算机微型化问题

实现这个设想—把东西做得很小—我不知道具体该怎么做，但是我确实知道一点，现在的计算机是庞然大物，可以把很多房间塞满。要做微型计算机，为什么不能把里头的电线和元件都做得很小—我这里说的很小，确实是很小。比如，电线直径是10或100个原子大小，电路的宽度是几千埃。任何一个分析过计算机逻辑理论的人都会得到这个结论：如果计算机元件的尺寸能缩小几个数量级，它的结构更复杂，那么它的潜能也就非常大，它能做到的事情也非常有意思。如果计算机的元件数量是现在的100万倍，它就能做决策，对于给定的计算任务，它就会有时间推算出最佳方法。它们会根据经验，选择更好的分析方法—比我们告诉它们的方法更好。在其他很多方面，它们也有新的功能。

如果我看到你们的脸，我马上会知道自己以前见过你们（我的朋友肯定会说，我举的例子很不妥当，但是，至少我能认出那是一个人，而不是一个苹果）。但是，假如给机器看一张人的脸部照片，它就不能以同样的反应速度判断那是一个人，它更没有办法辨认出那是它之前曾经见过的那一张人脸，除非照片是一模一样的。而人就不同了：无论是那人的面目改变了，我离他的距离远或近，还是光线改变了，我都能辨认出来。也就是说，我脑子里的那个“微型”计算机很容易就能做到这一点。而我们制造的计算机就不行。我脑子里的“元件”数量远比我们造出来的“神奇”的计算机多得多。现有的计算机太大，而我们脑子里的“元件”极其微小。我想造的比人脑“计算机”的元件还要小。

现在，如果我们想制造一个具有所有这些奇妙功能的计算机，它大概得是五角大楼的大小。现在想做到这一点，有很多不利因素。首先，需要太多的原材料：全世界的锗都不够用来制造这个庞然大物里所需的所有晶体管。另外，机器发热和功耗也是问题：维持计算机的运行，需要的功率要以TVA（109伏安）为单位来计算。但是，更实际的困难是，计算机的速度会受到限制。由于体量很大，内部信息传递需要一定的时间，而且这个速度不可能比光速还快。因此，要求计算机速度更快、结构更复杂，那就必须把计算机做得越来越小。

把计算机做得更小，还有大量的发展空间。目前，我还找不到阻碍计算机元件极度微型化的物理学原理。事实上，极度缩小计算机元件还有很多有利条件。

以蒸镀法微缩计算机

我们怎样才能制造这样的机器？需要用到哪一种制造工艺？还有，既然我们讨论过通过排列一定的原子来“写”下信息，我们就会考虑这种做法：先蒸镀金属原材料，然后在此基础上再蒸镀一层绝缘体，接着再蒸镀一层电路电线和一层绝缘体，如此这般进行下去。因此，你只要一次次完成蒸镀操作，最终会得到一块含有很多计算机元件的东西—包括线圈、电容、晶体管及其他元件—它的体积极其微小。

但是，我还想探讨其他的可能性—想想也好玩。为什么不能像制造大型计算机那样来制造这些微小的计算机？为什么不能在极小的空间钻孔、切割、焊接、冲压和铸造各种形状？成功浇铸某一件东西，其尺寸能小到什么程度？在你研究一些小东西时（比如你妻子的腕表），你曾经多少次对自己说：“如果能训练小蚂蚁来做这件事就好了！”我建议考虑一下训练小蚂蚁、训练螨虫完成这些事情的可能性。那些微小可是能活动的机器能做些什么呢？这些机器可能有用，也可能没什么用处，但是，把它们制造出来一定很有意思。

考虑把任何一种机器—比如小汽车—按一定比例将其微缩到极其微小的程度，我们来看看会有哪些问题。假设某种造型的小汽车，其零部件必须有一定的精确度，比方说4/10000英寸（约0.01毫米）。如果一个气缸的精确度达不到这个标准，汽车就不会正常开动。如果要制造的东西实在很小，达到原子级别，也就是说，如果一个圆很小，我们就没有办法做出由这些球形的原子组成的圆。因此，如果我的误差是4/10000英寸，对应的是10个原子大小的误差，那就意味着汽车可以缩小到原来的大约1/4000，也就是1毫米大小。很明显，如果你重新设计的汽车，它能容忍比这大得多的误差（这并非完全不可能），那么你就能制造出更小的装置。

考虑这样小的机器会出什么问题，这很有意思。首先，在零件承受同等应力时，外力施加在已经减小的面积上，这样一来，重量与惯性等因素相对来说就不重要了。换句话说，材料本身的强度变得很重要。举个例子，只有在缩小飞轮尺寸的同时，以同等幅度提高其转速，这样由

于离心力造成的飞轮的压力和张力才能保持平衡。另一方面，我们使用的金属是晶粒结构，在尺寸极度小的情况下，这种结构很麻烦，因为材料不够均匀。像塑胶和玻璃这些非晶体的材料，它们的材料分子分布就均匀得多，因此，我们要用这类材料来制造我们的超小型机器。

机器整个系统中的电子元件存在一些问题—也就是铜导线和磁性元件有问题。这些元件尺寸变得极其微小时，磁体的性质也会变化—跟普通大小的元件相比，这里牵涉到“磁畴”的问题。一个大的磁体可以有上百万个“磁畴”，当它被微缩时，可能只有一个“磁畴”。可见，电子元件不能只是单纯缩小尺寸，必须进行重新设计。但是，我觉得重新设计微型元件并让其运转，这根本不算什么问题。

润滑的问题

在润滑这个问题上，有一些有趣的东西。润滑油的有效黏度随机器尺寸的缩小而越变越大（如果我们尽可能加快速度）。如果速度没有被提得那么快，并且把油换成煤油或其他液体，情况还不算糟糕。事实上，机器也许根本不需要润滑。因为还有其他很多的动力可用。就让轴承干转吧，它的温度不会升高，因为这么小的元件散热非常快。热量散失如此之快，这会导致汽油无法爆燃，因此使用内燃机是不可能的。可以利用这样的化学反应—它们能在低温环境下释放能量。或者，对于如此之小的机器，外部提供电能很可能是最简便的解决办法。

这样小的机器有什么用处？谁知道呢？当然，这么微型的车辆也许只有小虫子才能开着到处逛。然而，我们确实注意过这种可能性—在全自动化工厂生产用于超微型计算机的微小元件，那些工厂里配备有超小型的车床和其他机床。那种小车床的构造，也不一定非要跟我们传统意义上的大车床完全相同不可。有请各位发挥自己的想象力来改进设计—请记住，要充分利用微观世界的各种特性，选择一条最轻松实现全自动化的路子。

针对微型机器的用途，我的一位朋友（A.R.Hibbs）提了一个非常有趣的建议。他说—虽然这个想法非常大胆—做外科手术时，如果你能把做手术的医生吞下去，那就会很有意思。把机械外科医师放到血管里，它会进入心脏，四下“观察”（相关信息当然要传送出来）。它会找到有问题的瓣膜，然后拿一把小刀割除病变的部分。有一些小机器可能需要永久放置在体内，帮助有功能障碍的器官正常工作。

现在就是这个有意思的课题：我们怎样制造这样小的机器？我把这个问题留给大家。但是，我会提一个听起来很奇怪的建议。在原子能工厂里，人们不能直接处理和操控一些材料与机器，因为它们有放射性。为了旋出螺母和旋入螺栓，人们会用到一套主从机械手，因此，你在这里操纵一套操作杆，就可以控制那边的“机器手”，这样就能很好地进行操作。

事实上，这样的设备大多数构造都很简单，关键是有一条特殊的电

缆—就像控制木偶的牵线一样—这条电缆把控制端和机械手直接连接起来。当然，这套设备要用到伺服马达，因此两处设备的连接是靠电力驱动，而不是靠机械传动。当你转动操纵杆，伺服马达也随之开动，它能改变电线里的电流，从而改变另一端的马达的位置。

现在，我想造一个类似的装置—由电力驱动的主从操控系统。但是，我希望看到的是一个精心打造的主从操控系统，它由当今制造大型机器的机械师负责制造，其尺寸是你直接控制的“机械手”（也就是主操控系统）的1/4。所以，你就可以在这1/4的空间里操控这一切—小型伺服马达驱动小型的机械手摆弄小号的螺母和螺栓，它们还可以钻孔，而它们全部是通常尺寸的1/4。啊哈，我造出的车床和工具只有通常尺寸的1/4，而我还可以用这套车床和工具造出另一组主从机械手，其尺寸又只有原先那一组机械手尺寸的1/4—在我看来，那就是最初的正常尺寸的1/16。做完这一切之后，我直接把电线从正常尺寸的主机械手连接到1/16尺寸的伺服马达上，也许中间还要通过变压器。这样我就可以操控只有最初尺寸1/16的从机械手了。

这就是我设想的工作原理。这个任务相当有难度，但是我们有可能实现。你可能会说：一个步骤缩小到原来的1/4？我们可以把步子迈得更大一些！当然，这一切都需要精心设计，而且不一定非要做成“机械手”不可。如果你用心思考，你就可能得到更好的解决方案。

即便用现有的缩放仪就可以实现缩小到原来若干分之一的目的—远远小于1/4，而且是一次性操作就可以实现。但是你不能直接利用常规尺寸的缩放仪来制造微缩的缩放仪，然后再用后者制造更微型的缩放仪—因为孔洞的松弛和仪器结构的不规则会带来误差。缩放仪末端颤动造成的误差比你用手移动时带来的误差还要大。以上述方式连接起一串缩放仪，其尺寸持续缩小，最后，我会发现最小的那个仪器的末端振动得太厉害，它根本不能完成什么任务。

每个阶段都有必要提高机器部件的精度。打个比方，我们用缩放仪制造了一个小车床，我们发现其中一个导螺杆形状不规则—比原始尺寸的导螺杆还不规则—那么，我们就可以把它拧进那些易碎的螺母里，反复拧进拧出，直到最后，确保导螺杆跟原始尺寸的导螺杆严格按一定比

例缩小。

我们可以让不平滑的表面互相摩擦使其变得平整，我们用的是三重法—也就是三对平面互相摩擦，这样一来，起初不平滑的表面就会变得平整了。可见，只要操作方法得当，提高微缩机器的精密程度并非不可能实现。因此，在制造这类机器时，很有必要在每一个步骤花一些时间提高设备的精密程度，需要制造精密的导螺杆、约翰森量块，还有其他所有的零件—我们制造精度更高的机器会用到这些零件。每一个阶段都需要制造下一阶段所需的零件—这是一个旷日持久又很有难度的项目。也许你能找到更快更好的微缩机器的办法。

做完所有这些工作后，我们拿到手的是只有原来1/4000的超小车床。但是我们想要制造功能超强的微型计算机，方法就是在这个超小车床上打孔、生产出这种计算机所需的小垫圈。那么，在这样的超小车床上你能生产多少垫圈呢？

一百只小机械手

至于那些在原始尺寸上缩小到原来1/4的从机械手，我打算做10组。我把10组机械手都连接到那些杠杆（主机械手）上，这样一来，每一组从机械手都会同步做同样的动作。在下一阶段，我要把机器再次缩小到原来的1/4，这时，我让每个从手臂再生产出10组（缩小到原来的1/4）小从手臂，这样我们就有了100组缩小到原来的1/16的从手臂。

这样能生产出来上百万台小车床，那么有地方摆放它们吗？这根本不是个问题：所有这些小车床加起来，跟原始尺寸的车床相比，还是要小很多。举个例子，如果我生产出10亿台小车床，每台小车床都是缩小到原来的1/4000，这样的话，生产它们的原材料和存放它们的空间都不是问题—因为所需的原材料还不到原始尺寸车床的2%。所以说，原材料根本费不了几个钱。因此，我想建10亿个这样的微缩工厂，其构造完全一样，它们同步开动，打孔、冲压零件，做所有的诸如此类的事情。

在机器尺寸变小的过程中，会出现一些有趣的情况：不是所有的东西都是按比例变小的。比如说，由于分子间的引力（范德华力27）导致材料粘连的情况。具体情况会是这样：生产出一个零件之后，你从螺丝上拧下螺帽，结果螺帽掉不下来，因为几乎没有重力，甚至你想把螺帽拧下来也很难。这就像老电影里的情节：一个满手粘满糖浆的人想要甩掉粘在手上的一个水杯。还有很多类似的问题，我们在做设计时都要考虑到。

重新排列原子

但是，我不害怕去思考这个终极的问题：最终，在辉煌的将来，我们是否可以按照自己的需要来排列原子？对，就是原子，一直到物质构成的底部，最基础的层面。设想一下，如果我们可以按照自己的想法，一个一个去排列原子，那世界将会怎样？当然，要合理地去排列原子。比如，你不能把原子排列成从化学角度来说不稳定的方式。

到目前为止，我们从地里挖出矿物，就觉得很心满意足了。我们加热它们，利用它们大规模地做一些事情，而且，我们希望从有那么多杂质的矿物中提取纯净的物质，等等。但是，我们必须接受一些大自然已有的原子排列形式。我们不可能拥有，比如说，像“棋盘”那样的一种排列，其中杂质相距正好是1000埃，或者是其他什么特定的排列方式。

我们怎么处置那些层状材料呢？如果真的能按照我们想要的方式排列原子，这种物质的性质又会是怎样的呢？对这些问题开展理论研究很有意思。将来会发生什么情况，我当然不能预测其中每一个细节，但我对一件事情毫不怀疑，那就是：当我们能在很小的微观层面控制物质成分的排列方式时，这些物质可能具有的性质将会极其多样化，而我们能做的事情也会更加多样化。

试想一下，我们在一小片材料上做出小线圈和电容器（或者类似的固态元件），电路里每个元件的大小是1000埃或10000埃，一个个元件首尾相连，占了一大块区域；在另一端则有小小的天线伸出来—这些构成了整个电路。这些小天线有没有可能发射光线，就像我们用天线装置发射无线电波，向整个欧洲传送广播节目那样？其共同点可能在于向一个方向打出非常密集的光线（也许这样的光束没有太大的技术意义或经济价值）。

我考虑过制造微缩电子元件存在的一些问题。阻抗就是一个很严重的问题。如果你做一个微缩的电路，其元件的固有频率就会增高（因为波长和元件大小成正比）。但是，趋肤效应的径向深度只跟比例尺度的平方根成反比，因此阻抗的问题尤其棘手。如果频率不是太高，也许我们可以利用超导或其他办法来解决阻抗问题。

小世界中的原子

到了这个极其微小的世界—比如7个原子构成的电路—我们就会发现很多新鲜的事情，说不定有机会成就全新的设计。微缩世界里的原子活动规律属于量子力学范畴，跟普通世界的物理规律没有一点相似之处。因此，在我们进入这个微缩的世界，还有对待原子的时候，我们要遵循不同的物理原理，还要做不一样的事情。我们会用不同的方法制作东西，我们不仅可以用电路，还可以用这样一些系统—或是包括量子化的能级，或是包括量子自旋的相互作用。

我们会注意到另一件事情：只要把东西造得足够小，我们所有的设备都可以大量制造，而且完全一模一样。两台体形硕大的机器，我们是没有办法造得一模一样的。但是，如果你的机器只有100个原子摞起来的高度，那么只要保证0.5%的精度就可以确保两台机器完全一样了—也就是100个原子摞起来的高度。

在原子这个层面，我们会看到新的作用力、新的可能性和新的效果。制造和复制材料的情况会迥然不同。正如我所说的，我受到生物学现象的启发：重复利用化学作用来制造各种奇异的效果（作者也是其成果之一）。在我看来，物理学原理并没有否定用一个个原子进行操控的可能性。这个尝试并不是有意去违背任何原理，这是理论上可行的事情，可是，只因为我们体量太大而未付诸实践。

最后，我们可以进行化学合成了。化学家会过来跟我们说："呃，我想要一个分子，它的原子排列是如此这般……你们帮我把它弄出来。"化学家要想得到某种分子，他做的事情就很神秘。当他确定这种物质有那种环后，他就会把这些和那些物质混合在一起，摇一摇，如此这般折腾一番，在这整个艰辛的过程之后，他通常都能合成他想要得到的东西。等我的整套设备可以运行的时候—我们就可以用物理方法进行合成，而化学家可能找到合成几乎任何一种东西的方法了，所以，我这套东西可能完全派不上用场。

但是，（我想）只要化学家写下一个分子式，物理学家就能够合成这种化学物质（理论上来说），这确实很有意思。化学家给出分子排列

方式，物理学家就能合成这种物质。这事儿听上去如何？按照化学家给出的分子式排列原子，你就能合成这种物质。如果我们能最终看清楚原子，并提高在原子层面行事的能力，这对于解决化学和生物学上的很多问题会很有帮助。我认为这样一种发展趋势是人们避无可避的。现在，你可能会问：“谁会来做这件事，而且他们为什么要做这件事呢？”好，我已经指出了这项技术有经济价值的几种应用形式，但是我知道，你们可能就是出于好玩才去做这件事的。那就玩个痛快吧！我们找几个实验室竞赛吧！一个实验室制造出微型马达，然后寄到另一个实验室，而第二个实验室要制作一个可以装在那个微型马达转轴里的东西，然后再寄回去。

中学竞赛

为了好玩，也为了让孩子们对这个领域产生兴趣，我建议和中学有些联系的人考虑组织一个中学之间的竞赛。毕竟，在这领域我们自己还没有开始研究，可能连孩子也能写出人们以前未曾写过的小型字。他们可以在中学之间做一个竞赛。洛杉矶中学给威尼斯中学寄一个大头针，针头上面写着几个字："这个怎么样？"（How's this?）随后，洛杉矶中学会收到威尼斯中学寄回来的这枚大头针，字母"i"上面的那一点里多了几个字："没什么大不了的！"（Not so hot.）

我说的这些可能不足以激励你们去做这事，也许只有经济刺激才行。我想做成这事，但是现在还不行，因为我还没做好铺垫工作。我个人愿意提供1000美元作为奖金，用来奖励第一个能做到这件事情的人：把一页书的页面缩小到原来的1/25000，而且所有的内容能通过电子显微镜看到。

我还想再设一个奖—我希望自己能把要求讲清楚，免得以后卷入争端—奖励1000美元给第一个造出能运转的电动马达的人，是能从外部控制的旋转电动马达，不算引线，马达的各边边长都不超过1/64英寸。我很希望这些奖金不用等得太久。

最终，费曼兑现了这两个奖金。下面的内容来自《费曼与计算》的概述，此书编辑是安东尼·J.G.海伊（马萨诸塞州，雷丁，珀尔修斯出版社，1988），此处内容已获得授权。

这两个奖他都颁出去了—第一笔奖金发给了加州理工学院的毕业生比尔·麦克莱伦（Bill Mclellan），那时离他这次演讲还不到一年的时间，他制造了一台合乎要求的微型发动机，但是费曼还是有点遗憾，因为制成这台机子并没有用到新的技术。1983年，费曼对喷气推进实验室的工作人员演讲时更新了一部分内容，他预测道："利用现在的技术，我们能轻松……制造出是麦克莱伦的电动机的1/64000的电动机，每条边的长度只有原先尺寸的1/40，而且我们一次可以制造上千上万台这样的电动机。"

之后不到26年的时间，他又发放了第二笔奖金。这次的获奖者是斯坦福大学的研究生汤姆·纽曼（Tom Newman）。费曼给出的挑战是把整套24卷《不列颠百科全书》写到一枚大头针的针头上。而纽曼计算的结果是，每个字母的宽度相当于50个原子排在一起的长度。在他的论文指导老师不在城里的时候，他利用电子束平版印刷技术，最终将查尔斯•狄更斯《双城记》的第一页缩小到原来的1/25000。人们认为，正是费曼的演讲开启了纳米技术领域的研究，现在我们定期举办“费曼纳米技术奖”比赛。

6 科学的价值

在夏威夷游览一座佛教寺院时，费曼学到了一条佛家关于谦卑的偈语：一念天堂，一念地狱。此章收录的是费曼最雄辩的一篇演讲，集中体现了他对科学与人类社会发展互相影响的思考。他还指出：科学家对未来文明负有责任。

人们时常对我说，科学家应该多关心社会问题—尤其是科学会对社会造成很大冲击，你们科学家应该在这方面多担责任。其他科学家也一定会碰到类似的情况。大家似乎普遍认为，只要科学家们多花些时间来关注这些非常棘手的社会问题，而不是花那么多时间忙活一些无关紧要的科学研究，我们的社会就会有巨大的改观。

在我看来，我们确实也会经常思考这些问题，只不过没有把它当成本职工作而已。因为，我们知道自己并没有解决社会问题的灵丹妙药—社会问题比自然科学问题棘手得多，而且，即便我们认真思考了那些问题，通常也没有什么结果。

我认为，科学家在考虑非自然科学问题的时候，他比普通人高明不了多少—当他就社会问题发表意见时，他也会像其他门外汉一样幼稚。今天我要讲的话题“科学的价值”不是一个纯自然科学的问题，所以，大家会发现今天的演讲肯定会验证我刚才这句话。

科学的第一重价值人人皆知，那就是“科学知识帮助人们做各种事情、制造出各种东西”。当然，如果我们做了善事，那也不单单是科学的功劳，引导我们行善的道德选择也很重要。科学知识是一种力量，我们用它行善，也能利用它作恶—它本身不能决定自己的用途。这样一种力量显然是有价值的，尽管可能由于使用不当而失去价值。

我曾经去过檀香山，在那里我学到了一个说法，它可以表述这个具有普遍性的人类社会问题。有个寺庙的住持向游客讲了一点点佛法，最后他送游客一句话，说这会让他们终生铭记—我本人就一直没忘。那是

佛经上的一句偈语：一念天堂，一念地狱。（原文：To every man is given the key to the gates of heaven; the same key opens the gates of hell.直译为：每人都有一把打开极乐世界的钥匙，同时这把钥匙也能打开地狱之门。）

如此说来，什么是打开天堂的钥匙的价值呢？确实，如果没有明确的指令指引我们打开天堂之门或是地狱之门，那么，我们手中的钥匙还真是个危险的物件。可是那把钥匙又显然有价值，没有了它，我们怎样去天堂呢？

没有钥匙，指令就毫无意义。所以很明显，虽然科学可能给世界带来巨大伤害，毕竟它还是有价值的，因为它能制造出有价值的东西。

科学的另一重价值是心智的享受。有人从阅读、学习和思索科学的过程中获得这种乐趣，还有人从科学研究中获得乐趣。这一点很真实，也很重要，而那些人对此却没有充分的认识—那些人说我们科学家有责任反思科学对社会的冲击和负面影响。

相对于整个社会价值而言，这种科学价值是否仅仅等同于个人乐趣？话不能这样说。应该说，我们也有责任去考虑社会存在的价值。归根到底，倘若社会发展的目标就是让人们能够享乐一切，那么，享受科学带来的乐趣就像其他任何事情一样重要。

但是我不能低估科学的世界观的价值—科学发现不断改变我们对于世界的看法。科学赋予我们想象力，那些恣肆汪洋的想象远比过往年月里诗人和梦想家所描述的更加不可思议和瑰丽多彩。科学研究告诉我们，自然的想象力远远超过人类的想象力。比如，我们这些地球人—其中一半人还头朝下—被一种神秘的吸引力吸附在一个不断旋转的球体上，而这个球体在茫茫宇宙中已经旋转了几十亿年，这难道不比“浩渺的大海里浮游着一只大海龟、海龟驮着象、象又驮着大地”这种想象更激荡人心吗？

我常常独自思考这些问题。如果在这里我提起这些众所周知的常识，或者这一类的知识，我希望在座各位能谅解，可是过去的人们不可能知道这些知识，因为他们和我们不一样，没有办法认识这个世界。

比如，我一个人站在海边，思绪万千。海浪翻滚……那是无数分子堆积成的，每个分子只管傻傻地忙乎自己的事……分明是亿万独立的个体……合在一起便形成了白浪。

代复一代，年复一年……生灵万物出现之前……惊涛便如此这般拍击着海岸。所为何人？又所为哪般……在一个没有任何生命可取悦、死寂的星球上。

永不停息……能量驱使一切……太阳肆意挥霍……倾泻于宇宙……些许就引发海的咆哮。

大海深处，分子重复一样的排列，直到生成复杂的新组合。它们复制自身……然后，崭新一幕上演。

日益增长的规模和复杂性，生物，原子团、DNA、蛋白质，舞着一个更为复杂的世界。

跳出海洋摇篮，走上干燥的大地……天地间有了一个它……有知觉的一堆原子……充满好奇的一团物质。

站在海边……奇迹在惊异中出现……我……在一个原子的宇宙中……不过是宇宙中的一个原子。

伟大的冒险

每当我们足够深入研究一个问题时，同样的激动、敬畏和神秘感，会一次又一次袭来。了解越多，研究越深入，就会发现更奇妙的秘密，诱使人们越发深入探究。从不在意结果可能令人失望，我们总是愉悦自信地翻开一块又一块石头，试图发现意想不到的奇妙之事，而它又会引领我们领略更美妙的问题和神秘之事—这无疑是一场伟大而美妙的冒险！

确实，不做科学研究的人，没几个人能有这种宗教般的体验。我们的诗人不去歌颂它，我们的画家不去描绘这样不同寻常的情景。我也不理解。难道没有人从我们科学家现在对宇宙的描述中得到创作灵感吗？科学的这种价值，至今还没有一个歌手颂扬过它。所以，今晚，诸位不得不听我讲科学—不是一首科学赞歌，也不是一首诗歌，就是听一晚上的讲座。可见，科学的时代还是没有到来啊！

造成这种局面的一个原因大概是，你需要看懂乐谱才能唱歌。举个例子，科学论文里说："老鼠大脑里的放射性磷每两个星期减少一半。"好了，这什么意思呢？

这意味着，老鼠的脑子（你我的脑子也一样）里面的磷已经不是两个星期以前的磷了。这意味着，脑子里的原子会被全部更替，原先的原子已经不存在了。

所以，这个大脑到底是什么呢？这些有意识的原子又是什么呢？就像是上星期吃的土豆！现在，它能记得我脑子里一年以前的想法，而那时候的脑子早就已经被换过了。

人们发现大脑里的原子需要多久会被别的原子替换，其意义就在于提醒大家，区别旁人和我的重要器官，只不过是一种组合，或说是一种舞步。原子来到我脑子里，跳一支舞，然后走人—原子常新，舞步依旧，永远记得昨天的跳法。

了不起的想法

当我们在报纸上看到这条消息："科学家认为，这一发现可能帮助人类攻克癌症。"报纸只关注一个想法的用途，而不去注意那个想法本身。难得会有人懂得一个想法的重要性，以及它是多么不同寻常。尽管如此，还是有些孩子会对这个想法感兴趣。一旦某个孩子被这想法吸引，我们就多了一个科学家。这些想法的影响力确实会慢慢扩大（即便众说纷纭，说看电视会替代思考），很多孩子会开始注意科学的各种奇思妙想—这样他们就可能成为未来的科学家。一旦等他们上了大学，那就太晚喽。所以，我们必须尝试着给孩子们讲解这些想法。

现在，我要讲讲科学的第三重价值了。这个价值不是那么直观，但并不牵强。科学家对于自己的无知、怀疑和不确定深有体会，我以为这些经历非常非常重要。当一个科学家不知道某个问题的答案时，他是无知的。当他凭直觉猜到结果会是怎样的，他并不确定。而当他对结果相当有把握时，他还是有一点点怀疑。我们发现，要进步，我们必须承认自己的无知，还要心中存疑—这种心态至关重要。科学知识是一些陈述的集合，这些陈述有不同程度的确定性—有的基本不确定，有的几乎可以确定，但没有一条陈述是绝对有把握的。

如今，我们这些科学家已经接受这一点了，并且理所当然地认为：存疑与科学并不矛盾—无知是一种常态。可是，我不知道是否每个人都意识到了这一点。今天我们能存疑的自由，缘于科学在发展早期与权威势力的斗争。那是一场酷烈的斗争，意义极其深刻。我们争取到了质疑的权利，也就是允许我们去怀疑，凡事都不能那么确定。我认为这一点很重要：我们不能忘记这场斗争的重要性，即使有可能失去业已得到的东西。这是科学家对社会的责任。

人类看来拥有无限的潜能，而相比之下成就却如此有限，每每想到这点，我们都会很难过。一次又一次，我们都认为自己本应做得更好些。前人在他们所处的黑暗时代中畅想未来；作为后来人，今天我们目睹他们的一些梦想实现了，而很多却仍然是梦想。今人对于未来的希望，很大程度上，依旧是古人对未来的梦想。

教育，是好是坏？

曾经有人认为，人的潜能之所以没有被完全开发出来，是因为大多数人没有接受教育。照这样说的话，随着教育的普及，人人都能成为伏尔泰吗？就教学成效而言，教人为恶与教人向善一样立竿见影。教育的作用很大，但它既可能是好事，也可能是坏事。

国家和民族间的交流必定会促进相互理解—这可能又是一个美好的梦想。可是，交流的渠道可以被操纵—或是畅通，或是被堵塞。交流的内容可能是真理，也可能是谎言。交流的作用很大，但是，同样地，它既可能是好事，也可能是坏事。

应用科学至少应该能给人们物质生活的保障吧。医药能控制疾病，这方面的记载好像全都是正面的吧。其实不然，也有人在孜孜不倦地埋头研制瘟疫病毒和毒药，以便用于今后的战争。

几乎所有人都讨厌战争。我们今天的梦想是和平。我们认为，在和平年代，人能够充分挖掘自己巨大的潜能。可是，一旦实现了永久和平，未来的人们可能会发现，和平同样是双刃剑，也有好坏两面。久享太平的人们也许会因为无所事事而酗酒，而酗酒对于一个想充分发挥自己潜能的人来说，将会是很大的一个障碍。

显然，和平也是一大力量，就像其他力量一样，比如清醒、物质力量、交流、教育和诚实，还有，梦想家的很多共同理想。

上述力量中，今天我们可以操控的力量比古人要多。或许，我们比大多数古人做得要好一点。但是，我们本来应该能做成更多且更伟大的事情，就此而言，我们那点可怜的成就只不过是沧海一粟。

原因何在？为什么我们不能战胜自己？

那是因为，我们发现，那些力量或是人的能量再也没有附带使用说明。例如，关于世界如何运行的知识，我们积累了很多。可是，这种知识越多，越让我们坚信，这些运行似乎毫无意义可言。各种各样的科学知识并不直接教人向善或是作恶。

古往今来的人们一直在寻找人生的意义。他们认为，如果有一个方向或意义来指引人类的行动，人类自身巨大的潜能必定会被释放出来。于是乎，很多很多的答案应运而生。可是，这些形形色色的说法相去甚远，其中某一种说法的支持者，会把信奉另一种说法的人们的行为看作是洪水猛兽。之所以心怀恐惧，那是因为看法不同，他们会认为信奉不同理念的人们的所有潜能都会被引入歧途，进入一条狭隘的死胡同。历史上有无数因虚妄的信仰导致的恶性事件，哲学家正是从中才意识到人类拥有无穷的、神奇的潜能。于是，新的梦想来了：如何找到那个通道？

那么，这其中的含义又是什么呢？如何一言道尽人生存在之谜呢？

如果凭借我们所有已知的知识，既有古人掌握的知识，也有现代人知道的而古人未知的知识，那么，我们必须坦白承认，我们不知道。

可是，坦白承认了这一点，也许我们已经找到了那个通道。

这不是一个新的想法：这是理性时代的想法。正是这一哲理启发了我们的先贤们，他们创造了我们目前生活其中的民主制度。这个想法就是：没有谁真正知道如何管理政府，所以我们应当创造这么一个制度，在这一制度下，新想法有机会产生、被试验、有可能被丢弃、继而产生更多的新想法；这是一个“试错”的制度。这一做法的出现基于这个事实：到18世纪末，科学已经证明自身是一个成功的冒险。把科学精神引入社会运行适当其时。那时关心社会运行的人们就已经清楚地看到：坦然面对各种可能性就会带来机会，怀疑和讨论是探索未知世界的关键。假如我们要解决前人从未解决的问题，我们就必须打开未知之门。

我们科学家的责任

作为地球上的一个物种，人类还处在初期发展阶段，问题一箩筐也不足为怪。人类的未来还很长。我们有责任去做我们该做的、尽量去学习、寻求更好的解决办法，并将这些办法传给后人。我们有责任尽量不给后人遗留下问题。在人类的年少轻狂期，我们有可能犯下严重的错误，以至于长时期阻碍自己的成长。我们人类还处于青少年期，还很无知，假如我们说自己今天就已经知道了答案，那就会犯这样的错。如果我们压制言论，压制批评的声音，宣称："这就是答案，朋友们，人类得救了！"这样一来，人类就会被长期套上权威的镣铐，并局限于眼前的想象。这样的事情已经发生得太多了。

身为科学家，我们知道，"假定自己是无知的"这种哲学态度取得了长足的进步，它具有巨大的价值，而这种进步是解放思想、自由思考的结果，所以我们有责任大声赞扬自由思考的价值；我们有责任让大家知道：为什么不要害怕质疑，而是要张开双臂去欢迎质疑，并展开讨论；我们有责任要求子孙后代也要拥有这一自由。

7　关于“挑战者号”航天飞机事故的少数派调查报告

1986年1月28日，“挑战者号”航天飞机在升空后不久爆炸，6名职业宇航员和1名中学教师不幸罹难。这个国家遭受了沉重的打击，NASA（美国国家航空航天局）颜面扫地、威望受损，而在这之前的很多年里，NASA均能成功完成空间发射任务—至少没有出现致命的失误。事后政府成立了一个调查委员会，除了查清事故原因外，还要求调查委员会给出具体措施杜绝此类灾难再次发生。该委员会由国务卿威廉·P.罗杰斯率领，成员有政治家、宇航员、军方代表和一位科学家。理查德·费曼就是调查委员会里唯一的科学家，他参与调查也许已经预示：挑战者号失败的原因不会成为一个永远的谜，一定会被找到。费曼比绝大多数人更有勇气，他还不辞辛劳，乘坐飞机穿梭于全国各地，找到地面工作人员。这些工程师坦言，在这次太空计划中，宣传起了主导作用，审慎和安全则退居其次。费曼的报告差点被调查委员会压下来，因为委员会认为这会让NASA很难堪。但是费曼据理力争，最终让自己的调查报告被收录在内—它只能屈尊被放在附录里。在调查委员会举办的现场直播的记者招待会上，费曼做了他那个著名的现场实验，实验材料仅仅是航天飞机上的一个密封圈（或O形环）和一杯冰水。这个实验形象地说明了是关键部位的垫圈出了问题，原因正如工程师们警告的那样—天气太冷不宜发射，而各级管理者为了能按时发射以借此在上级面前邀功，对这个警告置若罔闻。以下就是那个具有历史意义的调查报告。

导语

对于太空飞船机毁人亡的这种事故的风险评估，人们的看法分歧很大，他们给出的风险范围在1%到0.001%之间。一线工程师给出的风险评估值较高，而管理人员给出的评估值则很低。风险评估结果相去甚远，其原因何在？它又会带来什么后果？0.001%的出事概率意味着：在300年时间里，每天都发射一架航天飞机，只有一架航天飞机会发射失败。这么说来，我们就更有理由追问：到底是什么原因让管理人员这么信任飞船的性能，甚至到了迷信的地步？

我们还发现，《发射准备状态评估》中准许发射的标准逐渐被放宽。之前在同样风险条件下的发射没有失败，人们往往试图用这种侥幸成功的案例证明下次再进行类似的发射是安全的。因此，显而易见的缺陷一次又一次被容忍，有时他们会漫不经心地去修补缺陷，有时干脆推迟发射—因为隐患还没有被排除。

我手头的资料有这么几个来源。首先是以书面形式呈现的“准许发射的标准”的若干个版本，从中可以看到标准一路变化的痕迹：原先严格的标准不断被放弃、被偏离。还有，《发射准备状态评估》中记载的每次发射记录里包括论证此次发射风险可接受的论据。另外还有安全官员路易斯·J.乌利安基于固体燃料火箭成功发射的历程给出的第一手证词以及相关报告。身为发射中止安全委员会主席，他还对一个问题做了深入研究：对将来行星探测计划发射任务中钚动力装置（RTG28）可能导致的放射污染的评估。我也掌握了NASA对这个问题的研究资料。为了了解航天飞机主发动机的发展情况，我拜访了马歇尔太空飞行中心的管理人员和工程师，还和洛克达因公司的工程师私下碰了头。我还拜访了为NASA当过发动机顾问的独立力学工程师（来自加州理工学院）。为了收集航空电子设备（计算机、传感器和效应器）性能可靠性的资料，我专程去了一趟约翰逊航天中心。最后，还有1986年2月由喷气推进实验室的摩尔等人递交给NASA总部空间飞行办公室的报告—《对可重复使用载人火箭发动机的潜在应用的评估认证》。该报告谈论了美国联邦航空管理局和军方用于认证燃气轮机和火箭发动机的方法。我也私下访问了这份报告的作者们。

固体燃料火箭

安全官员研究了之前所有的火箭发射，然后评估了固体燃料火箭的可靠性。数据显示，总共发射将近2900次，其中121次失败（每发射25次失败1次）。但是数据里面包括所谓的早期错误，也就是每新出一种火箭，在最初几次试射中发现设计错误并予以修改。对于技术成熟的火箭来说，更合理的数字应该是每发射50次失败1次。如果能仔细挑选零部件和反复检验，失败率应该可以控制在1%以下，但是以今天的技术，0.1%可能无法达到（航天飞机上有两只火箭助推器，而固体火箭助推器的失效概率则决定了航天飞机的失败概率，所以航天飞机的失败概率应该翻倍）。

NASA官员辩解说，他们掌握的数据要低得多。他们指出，这些是不载人火箭的数据，但是，航天飞机是载人的飞行器，所以它“发射成功的可能性必然非常接近100%”。我觉得，这种说法想表达的意思不太清楚。是接近100%，还是“应该”接近100%？他们继续解释：“从以往的经验来看，这个极高的发射成功率已经使载人航天项目和不载人航天项目有了根本的区别；换句话说，一个使用数字概率来评判，另一个则是工程判断。”（这段话出自《行星任务中RTG安全性分析的航天飞机数据》3-1和3-2页，出处：NASA约翰逊航天中心，日期：1985年2月15日。）确实，如果失败概率低到0.001%，那就需要无数次实验来证明它（从那一连串非常成功的发射中你可能得不到发射失败的数字，只可能得出一个概率—迄今为止发射的总次数还不到10万）。但是，如果实际的失败概率没有这么低，通过合理的推测，发射飞船时就会出现这些情况：故障、事故未遂，甚至是事故。事实上，NASA以往的经验已经表明，就是这些偶尔的故障、未遂事故和事故在警告人们：发射失败的可能性并非那么小。不要通过历史经验决定飞行器的可靠性—而安全官员恰恰与这个呼吁背道而驰，同样与这个呼吁相悖而行的还有NASA，事事必提过往经历，就像之前说到的那个报告，一开头就是“从以往的经验来看，这种极高的发射成功率……”最后要说的是，如果我们用工程判断来代替标准的数字概率，那么为什么管理官员的估算和工程师的判断会有这么大的差异？看来，不管是出于什么目的—无论对内还是对外，NASA官员确实夸大了其航天产品的可靠性，甚至到了幻想的地步。

发射许可和《发射准备状态评估》的历史这里就不再重复叙述了（请参见调查委员会报告的其他部分）。在以往的发射中，一种现象毋庸掩饰，那就是允许使用已经发生腐蚀和漏气的飞船密封圈。很明显，“挑战者号”航天飞机就是一个例证。在它之前的类似发射被人们多次提到：都允许使用此类密封圈，都能成功发射，于是就被当成了安全的证据。但是腐蚀和漏气并不是设计的结果，它们在警示一定有什么地方出问题了。设备运行不符合预期情况，那就说明有危险：飞船以这种意外并且我们不能完全理解的方式运行，可能导致更大的偏差。之前这个危险没有导致大灾难，这并不能保证下一次不会发生大灾难，除非我们完全掌握了它的情况。这就像是玩“俄罗斯轮盘赌”一样，第一枪子弹空发根本不能让人完全松一口气，说不定开下一枪子弹就出膛了！造成密封圈腐蚀和漏气的原因以及会导致的后果，人们都不是很清楚。并不是每一次发射和所有的连接处都会发生腐蚀和漏气现象，这里头随机的成分很高。有时候，即使所有的条件都符合要求，为什么还是会发生大惨剧？

尽管每一次的情况都不相同，但是官员们的表现很是胸有成竹—他们彼此给出明显很符合逻辑的论证，经常用之前“成功”的发射作为依据。比如，在判断代号为51-L的飞行任务是否安全时—尽管在这之前51-C飞行出现过O形环（密封圈）腐蚀现象，他们指出，O形环腐蚀的深度只占到半径的1/3。因为先前一次切割O形环的实验证明：只有当切割的深度达到一个半径时，O形环才会失效。我们对造成腐蚀的因素知之甚少，而这一次发射，在不同的条件下腐蚀很有可能更厉害一些，他们非但没有认真考虑这个因素，反而声称“安全因子是3”。“安全因子”原本是工程术语，在这里使用这个术语显得很怪异。如果我们建造一座桥，要求它经受住一定的载重量，同时桥梁不会发生永久变形、开裂或折断，那么所用材料的实际承受力通常应该达到预计载重量的3倍。这个“安全因子”考虑到了以下因素：不确定的超载，不可知的额外负荷或者材料本身可能有意料不到的缺陷，等等。假设一下，现在预定载重加到这座新建成的桥上，而一根桥梁出现了一条裂缝，这就是桥梁设计上的失败。即便这座桥没有塌，因为裂缝的长度只有桥梁长度的1/3，但是这根本和安全因子没什么关系。固体火箭助推器里的O形环的设计初衷不是为了有朝一日它会腐蚀掉。O形环的腐蚀说明火箭某个地方出了问题，它

不是判断飞行器是否安全的一个指标。

不完全掌握导致O形环腐蚀的原因，人们根本不可能断定这一点——下回导致的腐蚀不会比前一回严重3倍。然而，官员们自欺欺人，自以为是，他们完全不顾一个事实，即发射飞船的条件每次都不同。他们设计了一个数学模型来计算腐蚀的程度，然而这个模型不是基于物理学的理解，而是以是否符合实证曲线为判断依据。说得更具体一些，他们设想一股热气流冲到O形环上，并在停滞点上测出热量值（到此为止，物理上还是合理的，符合热力学规律）。但是，在测定多少橡胶被腐蚀掉时，这个热量是唯一起作用的因素——而计算热量的公式出自用相似材料做实验得出的数据。这个经验公式用对数表示就是一条直线，因此他们把腐蚀程度定为热量值的0.58次方——0.58是由最接近的一个符合点确定的。无论如何，用其他数字代入公式，他们证实那个模型能推测出腐蚀的程度（腐蚀深度是O形环半径的1/3）。没有什么比相信这种答案更离谱的了！这个模型里不确定性比比皆是。气流的强度可能无法预测，它取决于油灰里形成的孔。漏气现象表明即使O形环没有被腐蚀或只是部分腐蚀，它也会失效。大家都知道，经验公式是靠不住的，因为那条拟合曲线并没有穿过那些把它画出来的数据点。很多点都不在曲线上，实际数值与曲线上相应的点的数值有两倍的差距——要么位于曲线上面，要么位于曲线之下。单从这一点看，对O形环腐蚀严重程度的估算翻一番也是合理的。公式里其他常数也有类似的不确定性，此外，还有别的一些不确定性。使用这个数学模型时，一定要密切关注诸多的不确定因素。

液体燃料发动机

在51-L飞行任务中，航天飞机的三个主发动机表现都很完美，一直到最后时刻，当燃料供应不足时发动机关闭。接着一个问题出现了：如果发动机失灵，我们也像调查固体火箭助推器那样去仔细调查它，我们是否会发现类似的弊病—NASA不够重视液体燃料发动机的缺陷，产品可靠性不断降低。换句话说，导致事故发生的管理漏洞只限于固体火箭助推器部门，还是普遍存在于NASA？为了得到这个答案，我还调查了航天飞机的主发动机部门和电子设备部门，但是我还没有调查轨道飞行器和外部燃料箱这两个部门。

与固体火箭助推器相比，发动机的结构要复杂得多，涉及的大量工程问题要求也更精细。总的来说，发动机的工程质量很高，其运行中发现的不足与缺陷显然也很受重视。

通常这种发动机（用于军用或民用飞机）的设计方式可以被称为“组件系统”或者“自底向上”体系。首先，必须彻底了解要使用的材料（比如用于制造涡轮叶片）的性能和局限性，而且要在实验台上测试来确定这些特性。掌握这些情况之后，稍大一些的部件（比如轴承）的设计和测试要单独进行。一旦发现有缺陷和设计错误，就要通过进一步的测试进行调试修正和验证。由于每一次只测试一种零部件，所以这些测试或修正的成本不会特别高。最后，我们开始逐步设计整个发动机，并使之符合必要的规范。到这时候，发动机成功的时机到了，或者说任何故障都可以很容易被锁定和分析，因为故障的模式、材料的局限性等都已经摸清楚了。调试发动机并解决最后遇到的难题也显得没有那么困难，因为在这之前，大多数严重的问题都已经被发现并被及时处理，花费的成本也不高。

但是，对于航天飞机主发动机的设计，采用的却是另一种方法，我们可以说，它是“自顶向下”的方法。发动机的设计和组装一步到位，几乎没有对材料和部件进行细致的初步研究。所以，当轴承、涡轮叶片、冷却管等出现问题的时候，很难找出原因和解决问题，代价也要昂贵得多。比如，高压氧涡轮泵的涡轮叶片出现了裂痕，那么，问题原因出在

哪里？是材料本身的缺陷，还是有氧环境对材料性质有影响？是启动或关闭时的热应力，还是稳定运行时的振动和应力？抑或其主要原因在于某些速度下产生的共振效应？还有很多其他可能性。从出现裂纹到它导致机器失灵，这期间需要多长时间？这个过程和机器功率在多大程度上相关？利用组装好的发动机作为试验品来解决这些问题，这个代价太高了。我们不会为了找出故障所在和弄清楚为何发生故障而牺牲整个发动机。但是，想要做到对发动机工作时的性能可靠性心里有数，就要精确掌握这些信息。没有细致的了解，就不可能有信心。

自顶向下的方法还有一个更大的缺点，那就是：如果某个缺陷被发现，除非重新设计整个发动机，否则一个简单的修补操作—比如改变涡轮罩的形状—可能都很难实现。

航天飞机主发动机是一个非常不同凡响的机器，与之前的所有发动机相比，它的推重比是最大的。它与那些发动机的相同点很少，或者可以说是截然不同的。因此，不出所料，各式各样的缺陷和困难层出不穷。不巧的是，它的设计方式是“自顶向下”的，所以那些缺陷很难被发现和弥补。设计一架能重复使用55次的航天飞机的目标至今也没有实现（总共工作27000秒，每次发射或试验用时500秒）。现在，这种主发动机需要非常频繁地维护和更换重要部件—如涡轮泵、轴承、薄片金属罩，等等。每飞行3次或4次，高压燃料涡轮泵就不得不更换（这个问题现在可能已经解决了），每飞行5次或6次，高压氧涡轮泵就要更换—充其量是预期耐用程度的10%。但是，我们主要关心的是决定主发动机可靠性的因素。

在过去总共250000秒的运行过程中，发动机大概出现过16次严重故障。工程人员密切关注这些故障，并试图尽快修复它们。他们采用的方法是在特殊设备上做实验—这些设备是专门针对这些问题而设计的；或是根据一些线索（比如裂纹）仔细检查发动机；或是做大量的研究和分析。这样一来，虽然有自顶向下设计带来的诸多困难，但是工程人员已经通过努力工作解决了很多问题。

下面是部分问题清单。那些带星号（*）的是可能已经解决的问题：

高压燃料涡轮泵（HPFTP）涡轮叶片裂缝（也许已经解决）。

高压氧气涡轮泵（HPOTP）涡轮叶片裂缝。

强力火花点火器（ASI）线断裂。*

净化止回阀故障。*

强力火花点火器内室腐蚀。

高压燃料涡轮泵涡轮的金属薄板开裂。

高压燃料涡轮泵冷却剂衬垫故障。*

主燃烧室输出弯管故障。*

主燃烧室输入弯管焊点偏移。*

高压氧气涡轮泵亚同步旋转。*

飞行加速安全中止系统（在冗余系统里出现部分故障）。*

轴承碎裂（已部分解决）。

4000赫兹的振动造成一些发动机不能运作，等等。

在这些已经解决的问题中，大多数是新型火箭设计早期的难题，因为有13个问题出现在头一个125000秒，只有3个问题出现在第二个125000秒。自然，你绝不能确信所有的隐患都被找出来了，何况，在某些问题上，人们可能连故障原因还找不准，就采取了某些补救措施。所以，我们做这个推测并非全无道理：在接下来的250000秒，可能至少会出现一次事故，每次发射中，每个发动机可能出现事故的概率是1/500。每一次发射有3个发动机在工作，但是可能会出现一些意外，而且这可能会影响其中一个发动机。如果只有两个发动机在工作，发射任务就会失败。因此，我们可以这样说，由于未知意外因素的存在，对于航天飞机主发动机故障可能导致发射失败的概率，我们的估计不能低于1/500—甚至是他们自己也不能过于乐观。此外，我们还必须考虑那些已知的但是还没有解决的问题（上文列出的问题中没有带星号的）可能

导致的后果。这个问题我们稍后再讨论。（火箭发动机制造商洛克达因公司的工程师，他们在综合考虑后给出的失败概率估计值是1/10000；马歇尔太空飞行中心的工程师给出的数值是1/300；与此同时，作为这些工程师负责汇报的对象，NASA却声称失败概率只有1/100000；而被NASA聘为顾问的一位独立工程师，则认为合理的估计值应该是1/100或1/50。）

发动机的合格标准的变化历程让人很困惑，而且很难解释得通。最初的标准好像是这样的：两个样机顺利工作的时间都必须达到（火箭成功发射）要求时间的两倍，那就是发动机的工作时间的标准（2×标准）。这个起码是联邦航空局的惯例标准，NASA看似也采纳了这个标准—最初的标准是能顺利发射10次（因此要求每个样机能成功发射20次）。显然，最理想用作参照物的发动机应该是那些总工作（飞行+试验）时长最长的发动机—所谓的“领航船”。但是，假如第三个样机或其他样机在很短的时间内失灵了，那该怎么办呢？当然，即便前两个发动机正常工作的时间超长，我们也不能就此认为这次火箭发射是安全的。也许，最短正常工作时间更能代表真实的风险，所以，如果将安全因子设为2，火箭使用的时间只能限制为最短时间的一半。

安全标准逐渐降低的例子有很多，我们就拿高压燃料涡轮泵的涡轮叶片做例子。首先，试验整个发动机的思路不适用。每个发动机的很多重要部件（比如涡轮泵）都在频繁地更换，所以安全规则的对象必须从整个发动机转移到零部件。如果两个样机能够安全工作一段时间，我们就把这段时间的1/2定为高压燃料涡轮泵标准安全时间（当然，事实上，人们已经不再坚持把10次安全发射的时间定为标准安全时间）。但是，怎样才算“安全”工作？在实际操作中，为了真正确保安全，联邦航空局施行的标准比2×标准还严苛—他们把涡轮叶片出现一条裂缝也视作失效。有些时候，在一段时间内—从涡轮叶片刚出现一条裂缝，然后裂痕不断扩大，到最后让涡轮叶片断裂，发动机还能够一直正常运转。（联邦航空局一直在考虑出台安全新规则—把这种特殊的“安全”状况也考虑在内，但是，要做到这一点，必须要在已知的经验范围内对已知的模型做非常仔细的分析，而且模型的材料也必须经过彻底的测试。而对于航天飞机主发动机来说，这些都不适用。）

高压燃料涡轮泵涡轮叶片的裂缝通常出现在第二级。有一台在1900秒后出现了3条裂缝，而另一台在4200秒后也没有出现一条裂缝—尽管在通常情况下，运行时间越长，出现裂缝的概率越大。为了进一步了解这个状况，我们需要认识到：应力很大程度上取决于功率级。在火箭发动机工作的大部分时间里，“挑战者”号航天飞机的功率级应该维持在额定功率级的104%—就像之前的发射任务那样。根据一些数据分析，功率级在额定功率的104%时，出现裂缝的时间大概会比109%功率级或全功率级（FPL）延后一半。将来的飞行也会保持在这个功率级上，因为这个功率级有更大的有效载荷，还有很多试验都是在这个功率级做的。所以，我们把104%功率级上裂缝出现前的那段时间除以2，就得到一个时间单位—等效全功率级（EFPL）。（显然，这也带来了一些不确定性，但是目前还没有对此开展研究。）之前提到的裂缝最早出现在1375秒EFPL。

现在，安全标准变成了“第二级（涡轮）叶片都要限制在1375秒EFPL之内”。可能有人提出反对意见，称安全因子为2在这里没有体现。实际上，涡轮机运转3800秒EFPL没有出现裂缝，这时间的一半就是1900秒EFPL，所以，实际上我们的标准还更保守。我们的自我欺骗表现在三个方面。首先，我们只有一个样机（符合这个要求），而且它不是“领航船”，而其他两个样机在3800秒和之后的一段时间内有17片涡轮叶片开裂（发动机内总共有59片涡轮叶片）。其次，我们已经抛弃了2×标准，并以等量时间标准来代替它。最后，在1375秒EFPL时确实开始出现裂缝。我们可以说：在1375秒EFPL之前，我们没有发现过裂缝，但是，我们最后一次检查结果显示，出现裂缝的临界点在1100秒EFPL。我们确实不清楚裂缝在这两个时间点内出现的具体时候，我们只能做这样的猜测—比如，裂缝有可能是在1150秒EFPL形成的。（将近2/3的叶片在实验超过1375秒EFPL后会出现裂缝。最近的一些实验已经明确显示，裂缝早在1150秒就出现了。）把标准定得高一些很重要，因为“挑战者号”的发动机的设定安全飞行时间非常接近极限安全时间。

最后，人们宣称，安全标准并没有被抛弃，整个系统是安全的，只不过不再遵照联邦航空局“（涡轮叶片）不能有裂缝”的惯例，涡轮叶片只有在彻底断裂时发射才算失败。按照这种规定，就没有哪一台发动机

算得上运转失灵。他们的想法是这样的：既然从裂缝开始出现到叶片断裂需要一段足够长的时间，那么通过检查所有叶片有无裂缝，就能保证绝对安全。如果发现了裂痕，那就更换涡轮叶片；如果没有发现裂缝，我们就有足够的时间完成一次成功发射。这种做法让涡轮叶片裂缝问题不再是关乎飞行安全的重大问题，而仅仅是一个如何让叶片持久工作的问题。

也许情况真的是这样。但是我们怎么就能断定：叶片上那些裂缝总是慢慢地开裂，而且不会在发射过程中导致叶片整体断裂？3个发动机已经运行了很长时间，其中有几个叶片出现裂缝（大概发生在3000秒EFPL），可是叶片整体断裂的情况没有出现。

但是，这种叶片裂缝的问题可能已经找到补救办法。通过改变叶片形状、对叶片表面进行喷丸处理29，或是进行绝缘化处理来杜绝热振动等方法，叶片就不会开裂。

高压氧气涡轮泵合格检验标准的历史变迁，情况跟高压燃料涡轮泵也十分相似，在这里我就不细说了。

总之，很显然，在对待航天飞机主发动机的一些问题上，飞行准备状态评估和安全认证标准都倒退了，这和我们看到的固体火箭助推器安全标准的倒退如出一辙。

航空电子设备

航空电子设备（avionics）是指轨道飞行器的计算机系统，也包括它的输入传感器和输出执行器。首先，我们只研究计算机本身，而不去考虑温度传感器、压力传感器等输入传感器传来的信息是否可靠，或者负责火箭点火、机械控制以及给宇航员呈现内容的执行器是否忠实地遵循计算机的输出指令。

整个计算机系统非常精密，程序代码超过25万行。它负责操控很多事情，包括飞行器爬升、进入飞行轨道的整个自动控制过程，当你按下某个按钮决定好登陆地点后，它操控飞行器飞回地球，直到顺利进入大气层（速度低于1马赫）。我们有可能实现着陆过程全自动化（除非起落架明显脱离了计算机控制，出于表面上的原因，必须由飞行员手动操纵），但是，相比之下，由飞行员控制飞行器着陆会比全自动化着陆更安全。飞行器在整个轨道飞行期间，其计算机系统被用来控制有效载荷，向宇航员显示信息，以及与地面（控制中心）交换信息。显然，出于飞行安全需要，必须确保整个计算机硬件和软件系统的精确性。

简单地说，硬件系统的可靠性通过四个完全独立且结构相同的计算机系统来确保。在这套系统里，可能每个传感器都有若干个备用传感器—通常是四个—这些装置会同时给这四个计算机系统提供信息。如果传感器输入的信息不一致，这时会根据实际情况确定有效输入，或是采用平均值，或是按照“多数表决”原则来确定。这四台计算机的算法是完全一样的，同样，它们的输入（每台机器都可以获取包括备用传感器在内的所有传感器的信息）也是一样的。因此，就任何一步运算而言，每台计算机的计算结果都应该是完全一样的。这些运算结果要经常拿来对比，但是因为计算机的运行速度可能有轻微的差异，所以在每一次比较之前，要启动一个停顿和等待系统。如果有一台计算机的计算结果与其他计算机不一致，或者它计算得太慢了，那么其他三台计算结果一致的计算机就会被系统承认，而那台表现不佳的计算机就会被系统彻底淘汰掉。（而这三台计算机中）如果有一台计算机也失灵了—评判依据是其他两台计算机结果一致，那么它也要被系统淘汰，它负责的后续飞行任务也被取消。向预定着陆地点降落的任务启动，负责操控的是剩下的那

两台计算机。由此可见，这其实是个冗余系统：仅有一台计算机失灵对它完成任务没有任何影响。最后，这个系统还有个额外的安全保障，那就是：还存在第五台独立的计算机—它的内存只装有发射爬升和降落程序，如果那四台主计算机有两台以上发生故障时，这台独立计算机还是能够控制降落过程的。

由于主计算机的内存空间有限，不能储存整个飞行过程中所有爬升、降落以及执行飞行任务的程序，所以这些程序要靠宇航员利用磁带安装，前后总共要安装四次。

为一个如此精密的系统更换软件系统需要耗费大量精力，更不用说换掉整个系统，所以，这个系统投入使用这15年来，硬件一直没有动过。现在的硬件系统已经过时了，就拿内存来说，还是老式的铁氧体磁芯。找到能供应这种老式计算机的生产商，还要求性能可靠、质量过硬，现在已经变得越来越难了。现代计算机的性能可靠得多，运转也快得多，电路简化了，还可以做更多的事情，而且不需要多次安装程序—因为它们的内存要比老式计算机大得多。

对软件的检测非常仔细，采取的是自底向上的方法。首先要逐行检测新的程序代码，然后检测有特定功能的代码段或模块。检测的范围逐渐扩大，直到新的变化全部融入整个系统并得到检测。这个完整的输出被当作最终的产品、最新发布的版本。但是，此外还有一个完全独立的独立检查团，他们对待软件研发团队的态度很严苛，他们测试和检查程序软件的细致程度，不亚于收到送货上门商品的消费者。在模拟器等部件启用新程序时，还要通过一个额外的验证测试。如果他们在验证测试中发现错误，会将其认定为非常严重的事故，而且，为了避免将来出现同样的错误，他们会非常仔细地研究导致错误发生的原因。迄今为止，在所有程序编程和程序更改（分别对应新的任务和任务调整）过程中，总共发现过六次这样的意外错误。他们遵循的原则是：所有这些检测不属于程序安全性的一部分，而是对安全性的测试，仅仅是为了避免灾难性后果。飞行安全与否，其判断依据就是这些测试中程序运行的状况，这里发现的任何错误都会引起有关部门的重视。

现在总结一下，计算机软件检测体系及其检测的仔细程度确实达到

了最高水准。这里并没有出现这种情况：一边降低标准，一边自欺欺人—对于固体火箭助推器或航天飞机主发动机的安全体系来说，这种情况很明显。确实，管理层最近已经提议要减少这样复杂、耗资又如此巨大的测试—他们认为，在航天飞机发展业已成熟的现阶段，做这些测试是没有必要的。我们必须抵制这些建议，因为持这种看法的人，他们没有认识到微妙的相互影响，整个项目的某一部分即便一个很细微的变化导致的错误也会影响到项目的其他组成部分。飞船的使用者一直在不断地提各种修改要求：要么提出新的任务，要么提出新的要求和修改意见。而按照他们的要求进行修改，代价很昂贵，因为需要做全面的测试。要省钱，合理的办法是尽可能减少变动，而不是降低每一次改动后（必须要做的）测试的水准。

有人可能要说，完全可以采用更先进的硬件和编程技术大幅度改进这套精密的系统。任何外部竞争者都在这件事情上有后发优势，对于NASA而言，这是否是个好主意，它也该认真考虑一下了。

最后，让我们的视线回到电子系统的传感器和执行器上来。我们发现，在关乎整个工程安全的故障和可靠性问题上，人们的重视程度反而不如他们对待计算机系统的态度。举例来说，我们发现了一个问题—一些温度传感器不时发生故障。而18个月之后，我们发现，同类的传感器还在使用，仍然时不时发生故障，直到有一次，两个温度传感器同时发生故障，发射任务不得不取消。可是在下一次飞行任务中，这种不可靠的传感器还在用。反应控制系统的情况也是这样，它的火箭助推器在飞行中起到重新定位和控制的作用，可是性能也不太可靠。长期以来，虽然发射故障常有发生，但是因为有相当数量的冗余系统，还没有一次故障严重到影响整个飞行任务。传感器负责检查火箭助推器的性能，如果一个火箭助推器未能成功点火，计算机就会选择另一个火箭助推器来点火。但是，从设计的角度讲，火箭助推器就不应该失效，这个问题应该得到解决。

结论

如果要执行一个合理的发射计划，工程技术的进展速度往往不可能满足最初的准许（飞行）标准的要求—那个准许标准定得非常严格，目的就是确保打造一个安全系数非常高的飞行器。在这种情况下，有关方面往往借助很微妙的、表面上又富有逻辑的论证，让标准得以改变，从而使飞行计划可以按时通过。这样一来，人们就要在一个相对不安全的条件下去执行飞行计划，其失败概率的量级在1%左右（人们要得到更精确的数据，那就很难了）。

另一方面，官方管理层声称，他们相信飞行计划失败的概率是这个数据的1/1000。他们这么做的一个原因可能是：让政府看到NASA计划周全，还能按时把事情干得很漂亮，以确保政府给予资金支持。另一个原因可能是他们真的相信失败率极低—这说明他们和一线工程师的沟通严重缺乏，甚至到了匪夷所思的程度。

无论是出于何种原因，都已经带来了非常不良的后果，其中最为严重的莫过于他们鼓励普通民众搭乘这样一艘危险的飞行器，就好像让他们乘坐普通飞机航班一样。和试飞员一样，宇航员应该清楚自己所冒的风险，我们钦佩他们的勇气。谁能否认麦考利夫（McAuliffe，"挑战者"号航天飞机上的那位女中学教师）的勇气呢？她能觉察到更真实的风险，而不是NASA官员让民众相信的那种级别的风险。

我们给NASA的官员提一些忠告吧，确保他们能够脚踏实地，直面现实，努力去充分了解航天技术的弱点和缺陷，进而能积极设法解决这些问题。在比较航天飞机和其他进入太空的方法在成本和成效方面的不同时，他们一定要遵循实事求是的原则。同样地，在签订合同、估算成本和评估项目难度等环节，他们也一定要秉承实事求是的态度。他们提出的飞行计划的时间安排一定要合理和切合实际，实施过程中也不至于为了赶期限导致状况百出。如果他们一一照做了，却得不到政府的支持，那就随他去吧。NASA得到的是公众的支持，它应该对公众持坦诚和诚实的态度，而且它有义务告知公众所有的真相。这样的话，这个国家的公民们就会在怎样运用他们有限的资源这件事上做出最明智的决

定。

对于一项成功的技术来说，尊重现实一定要凌驾于公共关系之上，因为你不能愚弄自然（规律）。

8 科学是什么

科学是什么？这是常识！真的是这样吗？1966年4月，费曼在全国科学教师协会（NSTA）大会上发表了一次演讲，在演讲中，他指导同行们如何去教学：教会学生像科学家那样去思考；教会他们用好奇的眼光、开放的心胸，最重要的是，用怀疑的态度去观察世界。这个演讲也要归功于费曼的父亲，他是一位制服销售员，是他教会费曼如何去看这个世界的。

感谢德罗斯先生给我这个机会，让我加入科学教师的大会。我也是一名科学教师。我的教学经验仅限于给研究生上物理课，而这种教学经验让我明白了一件事情：我自己并不知道该如何去教学生。

你们是真正的教师，在基础教育领域从事一线教学工作。你们指导新教师，安排课程是你们的专长，但我相信，你们也不清楚如何当好一名科学教师，要不然你们就不用费那么大劲跑这儿来参加这个会议了。

“科学是什么”—这个题目不是我选的，这是德罗斯先生给我出的演讲题目。但是我想说的是，我认为“科学是什么”根本不能等同于“怎么教科学”，我必须提醒你们注意这一点。理由有两个。首先，我站在这里准备给大家讲课，好像是要告诉你们怎么教科学—其实我根本没有这个意思，因为我对小孩子并不了解。我自己有一个孩子，所以我知道自己不怎么懂小孩子。其次，我想你们大多数人都缺乏那么一点儿自信（因为有那么多的演讲、那么多的论文和那么多的专家来探讨如何教学）。某种意义上，好像总有人对你们讲：为什么你们老师教不好学生，你们该学学怎样更好地去教学。我不会对你们横加指责，我也不会给你们什么所谓的“锦囊妙计”—照着做就一定能提高教学效果的方法。这不是我的来意。

实际上，每年都有很优秀的学生考入我们加州理工学院。这些年来，我们发现考进来的学生越来越优秀了。这到底是怎么一回事，我不

知道，但我想你们可能知道原因。我不想干预这种教学体系，它运行得很好。

就在两天前，我们开了个会议，决定没有必要再在研究生院开初等量子力学这门课程了。我读书的时候，研究生院都没有量子力学这门课程，老师们认为这门课程太难了。我刚开始教课的时候，我们的研究生院有了量子力学的课程。而现在，本校的本科生就要上量子力学的课了。而且，我们也发现，对于从外校考进我们研究生院的学生，现在也没有必要开设初等量子力学了。为什么这门课变成基础课了呢？那是因为，我们的本科教学质量提高了，其中很大一个原因就是：学生进大学之前接受了更好的教育。

科学是什么？当然，如果你们教的是科学课，你们肯定都知道。这是常识。我为什么这么说呢？因为如果你不知道答案，每本教科书的教学参考书里都会对这个问题有详尽的探讨。你会读到培根在数百年前说的话被任意曲解，人们断章取义，然后把它们胡拼乱凑在一起。在当时，培根的这番话被认为是对科学深刻的哲学解读。但是，当时最伟大的实验科学家之一，威廉·哈维30 —当时真正在做科学研究的学者—说："培根所谓的科学，是大法官的科学；培根提到了观察，但遗漏了判断力中最关键的因素，即要观察什么、什么值得注意。"

所以说，科学不是哲学家们嘴里的模样，当然更不是教学参考中所说的那样。"科学是什么"，这是我在接下这个讲座任务后给自己提的一个问题。

在这之后不久，我想起了一首小诗：

一只蜈蚣十分快乐，直到一只蟾蜍来开玩笑

说："嗨，你哪只脚先走，哪只脚后走？"

蜈蚣很困惑，但始终想不透

最终，它心神不定，掉进阴沟

却不知道该先迈哪条腿逃走

我这一辈子都在做科学工作，也知道科学是什么，但是要我到这里来告诉你们“科学是什么”就像是要蜈蚣说出“哪只脚先走，哪只脚后走”，这个我做不到。而且这首诗的类比修辞也让我发愁，我担心回去后我不知道该怎样做研究了。

在这次演讲前，已经有各路记者千方百计打听这次演讲稿的内容，而我不久前才着手准备，所以他们不可能打探到什么结果，但是我现在看到他们全都冲出去发稿子，估计题目会是这样：“费曼教授把NSTA的主席比作癞蛤蟆。”

要把“科学是什么”讲清楚有难度，而我又不喜欢哲学化的表述，那么，今天我要用一个很不寻常的方法来表达我的观点。我要告诉你们，我是怎么理解科学的。说起来有那么一点点孩子气。在我还很小的时候就是这么理解的，可以说从一开始它就进入了我的血液。我要告诉你们，对科学的这种理解是怎样潜移默化地改变我的。这听起来像是我会告诉你们怎么去教学，但是这不是我的本意。我是想通过讲述“我是怎样学会理解科学的”来告诉你们“科学是什么”。

这都是父亲教我的，他让我知道了“科学是什么”。据说—我没有亲耳听到—我母亲怀我的时候，我父亲说：“如果是个男孩，我会把他培养成一个科学家。”他是怎么做到的呢？他从来没有对我说过这样的话：你应该做个科学家。他自己也不是科学家，他是个商人，一个制服公司的销售经理，但他喜爱科学，经常阅读这方面的东西。

我很小的时候—这是我记得的最早的一件事情—那时我还需要坐在高脚的儿童餐椅上吃饭，父亲晚饭后会和我玩一个游戏。他从长岛市不知什么地方买回来大堆的旧的浴室地板砖，长方形的。我们把瓷砖一个接一个立起来，摆成很长的一条。接着，父亲允许我推倒最后一块瓷砖，然后我们看着整条瓷砖长龙倒下去。很好玩。

再后来，游戏升级了。那些瓷砖有不同的颜色，他要求我按顺序放一块白的，然后两块蓝的，接着再放一块白的和两块蓝的，就这样把所有的瓷砖摆好—我也许想先放一块蓝色的，但按他的要求必须先摆一块白色的。我想，你们已经领会到其中暗含的教学智慧，其实这并不深奥—先让他喜欢上一个游戏，然后慢慢往里面加教育的内容！

相比之下，我母亲要感性得多。她开始意识到父亲的良苦用心，她对父亲说：“麦尔，要是这可怜的孩子想放一块蓝的瓷砖，你就让他放吧。”父亲回答道：“不行，我要他注意上面的图案。这是我现在唯一能教他的，这相当于最基础的数学。”如果我是在讲“什么是数学”，我想我已经告诉你们答案了。数学就是寻找图案（实际上，这种教育确实有一些效果。我上幼儿园的时候，要接受一个现场测试。那时候我们有编织课。这种课对小孩子来说太难了，现在他们已经取消了这个课程。在课堂上，我们要用彩纸穿过垂直的带子来编织图案。幼儿园的老师很吃惊，她特地给我父母写了封信，说这孩子很不寻常，因为他能提前知道接下来会编织出什么样的图案，而且能编织出令人叹为观止的复杂图案。看来，小时候的瓷砖游戏对我确实有些帮助）。

我再举一个例子来说明数学仅仅是图案。我在康奈尔大学时，对那里的大学生群体相当感兴趣。在我看来，那个群体的主体是一大群愚钝的学生（里头有很多女生），他们上的是家政课之类的东西，只有一小部分学生有点头脑，是可造之才。我常常坐在校园的咖啡店里，那里有很多学生。我一边吃东西，一边听他们聊天，看看他们嘴中能不能蹦出个把有智慧的词语。有一天，我发现了一件很棒的事情—起码对我来说是这样的，你可以想象我是多么惊讶。

我听到两个女孩在闲聊，其中一个向另一个解释：“如果你想得到一条直线，你可以这么做：你起每一行时，你都要向右边走一个固定的距离，也就是说，你每走一行时都要走一个相同的量，那么你就能得到一条直线。”那可是解析几何里一条深奥的原理！她继续说下去，我简直惊呆了。我以前真不知道女性的心智竟然能够理解解析几何。

她继续说：“假设你还有一条线从另一边过来，然后你想计算出这两条线在哪里相交。假设这条线，你每向上移动一个量，它就向右移动了两个量；而另一条直线，每向上移动一个量，它就向右移动三个量，而它们一开始相距20步……”我听得目瞪口呆。她竟然算出了交点在什么地方！再听下去，我才弄明白她们在谈什么，竟然是一个女孩教另一个女孩怎么织菱形花纹的短袜。

从这件事我学到一点：女性有能力理解解析几何。有些人多年以来

坚持认为：女性和男性一样，都有理性思维能力（虽说反面证据比比皆是），他们说的也不无道理。问题也许就在于我们从未找到一种和女性沟通的方法。如果方法得当，你也许能有新的发现。

好，我继续讲我自己小时候学数学的亲身经历。

我父亲告诉我的另一件事情—我说不好，说是一件事情，其实更多的是情感因素—所有的圆，不管它尺寸多大，其周长与直径的比率都是一样的。对我来说，这并不是很难理解的，但是这个比率很奇妙，那是一个美妙的数字，一个很深奥的数字，它叫“派”[31]。那时候我还是个小孩，不能完全理解这个数字的奥秘，但这是个了不得的东西，从此我到处留心寻找这个π。

后来我上了小学，学会了怎么求小数，怎么计算，我计算出的结果是3.125，并且想，我又知道了圆的周长与直径之比π的另一种写法。老师把它纠正为3.1416。

我说这些事情就是想说明早期教育的影响。 “这还是一个未解的秘密”“这个数字很神奇”这样的想法对我很重要，那个数字本身是什么并不重要。很久之后，我在实验室做实验—我说的是在自己家里弄的一个实验室，其实也就是捣鼓点小东西—不，对不起，我没有做实验，从来不做；我只是胡乱捣鼓点小东西。我组装了一台收音机和一些小玩意儿，就是瞎鼓捣。渐渐地，通过书本和手册，我开始发现一些方程式可以用在和电相关的东西上，比如电流和电阻之类。有一天，在一本书上，我发现了一个振荡电路频率的计算公式，$2\pi\sqrt{LC}$，其中L是电感，C是电路的电容。这儿有个π，但是圆在哪儿呢？你们在笑，但是我当时是很认真地在思考这个问题。在我印象里，π是和圆相关的一个东西，现在电路里也出来了个π，那么圆在哪儿？是用什么符号表示的呢？你们这些在笑的人，你们知道这个π怎么来的吗？

我身不由己地爱上了这个东西，不由自主地去寻找它，思考它。然后，我意识到，线圈是圆的，一定跟这个有关系。大概半年后，我看到另一本书，书上有圆形线圈产生的电感，还有方形的线圈，它也能产生电感，而这些公式中也有π。我又开始思考，我认识到π不是从圆形线圈

里来的，它们之间没有什么关系。现在我能更好地理解π了，但是在我心中，我仍然不太清楚那个圆在哪儿，那个π又是从哪儿来的……

我想就语言和定义的问题说几句，先中断一下我的小故事。因为我们必须学习语言。它不是科学，但这并不意味着：仅仅因为它不是科学，我们就可以不教语言。我们不是在谈怎么教学，我们是在谈科学是什么。知道怎么把摄氏温度转换成华氏温度，这不是科学。这种知识很重要，但它不是严格意义上的科学。同样地，如果你在讨论什么是美术，你不会说，美术等同于“3B铅笔比2H铅笔柔软”这样的知识。两者完全不是一码事。这并不是说，美术老师不该教这些铅笔的知识，也不是说画家不懂这个也会画得很好（其实，你只要试一下，一分钟之内就能发现3B铅笔确实比2H铅笔柔软，但这是个科学的方法，而美术老师可能不会想到要去解释它）。

为了与别人交谈，我们必须使用语言，就是这样。你想知道这两者有什么不同，这很好，你要弄清楚我们什么时候在教科学的工具—比如语言，什么时候在教科学本身，这也很好。

为了把这一点说得更清楚些，我要挑一本科学课本，指出一些问题，可能不怎么留情面。这可能有些不公平，因为我相信，不用费什么力气，我同样能在其他书里找到类似的问题来批评一番。

这是一本一年级的科学课本，很遗憾，一年级的第一堂科学课，它就以一种错误的理念来教小学生学习科学—对于科学是什么，教科书自身的理念就是错误的。书上有几幅图：一只可以上发条的玩具狗，一只手按下发条的按钮，然后这狗就能动。最后一幅图的下面写着一个问题：“是什么让它动起来的？”紧接着是一张真狗的图片，还是这个问题：“是什么让它动起来的？”在这后面，是一张摩托车的图片和同样的问题—“是什么让它动起来的？”就这样一路问下去。

一开始，我以为他们准备向学生介绍科学有哪些学科门类，比如说物理、生物、化学。可事实不是我想的那样。这本书的教学参考给出了这样的答案：“能量让它动起来的。”

能量是个很难捉摸的概念，人们很难正确把握它。我的意思是，能

量这个概念，人们如果想要能够正确运用它，想要用能量的概念正确地推导出一些东西，是很难的。这超出了一年级小学生的接受能力。（这样子来回答那个问题，）还不如说“上帝让它动起来的”“意念让它动起来的”或“可移动性让它动起来的”（就实际效果来说，这样的回答和“能量让它动起来的”是一样的）。

我们应该这样来看：那只是能量的定义。我们应该反过来解释。我们应该说“如果某个东西能运动，它里面就有能量”，而不是“使它运动的是能量”。这个差别很微妙。惯性也一样。我来把这个差别说得更清楚一点：

你问一个孩子“是什么让玩具狗动起来的”—假如你问一个正常人这个问题，那你就应该先思考一下。答案是：你拧紧发条，而发条要松下来，于是这个力推动齿轮转动。这是多好的科学课启蒙啊！我们把玩具拆开，看看里头是怎样运转的。你要观察齿轮的巧妙设计，你要观察棘轮。学一些关于这个玩具的知识，安装玩具的方法，人们能设计出棘轮还有其他东西，由此可见人类的智慧，等等。这样会很好。（那本教科书上的）问题提得很好，答案未免有点缺憾，因为他们想要教给学生的是能量的定义，但是学生什么也没学到。

设想一下，假如一个学生说：“我不认为是能量让它运动的。”你该怎么把问题讨论下去呢？

我最终想出了一个办法，可以用来检测你究竟是传授了一个思想还是教了一个概念。我们这么来检测：“不要用你刚学到的新词，用你自己的语言复述一下你刚学到的内容。”“不要用‘能量’这个词，请告诉我，关于那个玩具狗的运动，你现在学会了哪些知识？”如果你说不出来，那么，你除了概念什么也没学到。相关的科学知识你什么也没学到。这也许还不大要紧。关键是你可能立马不想学习科学了，因为你不得不学习很多定义。用来启蒙的第一堂科学课就是这个样子，这难道没有可能（给科学教育）带来毁灭性的灾难吗？

我认为，在第一堂课上只是为了回答问题去学习一个神秘的词语，这简直太糟糕了。那本书上还有其他例子—“重力使它下落”“你的鞋底磨损了，是因为摩擦力的作用”。鞋子磨损了，是因为它和人行道频繁接

触，人行道上坑坑洼洼，很容易磨损鞋子。仅仅扔出“摩擦力”这个专用名词来解释，实在令人提不起兴趣，因为这不是科学。

我父亲也讲过一点跟“能量”有关的事情，在我有点儿理解它之后，他就开始使用“能量”这个词。假如他要给我讲解能量问题，我想他会这么做—他确实做过类似的事情，虽然他举的例子不是玩具狗。如果他真的拿玩具狗做例子，他会说：“它动了，是因为阳光的照射。”我会说：“不是的。这和阳光的照射有什么关系？它动了，是因为我给它上了发条。”

“那么，我的朋友，你怎么有力气上这个发条呢？”

“我吃东西了。”

“你吃什么了，我的朋友？”

“我吃粮食了。”

“粮食是怎么生长起来的？”

“因为阳光的照射。”

狗也是这样。汽油呢？也是太阳能的积累：植物吸收太阳能，随后把它储存在地下。其他事物也一样，最终都和太阳有关。你看，同样是自然界的一件事情，我们的教科书上表述得那么死板，这里却讲得这么生动。我们看到的所有运动着的东西，它们之所以能够运动都是因为阳光的照射。这确实解释了一种能量可以转变为另一种能量。但是孩子也可以不接受这样的解释，他会说：“我认为这不是因为阳光的照射。”然后你可以和他展开讨论。这就是区别所在（稍后我可能向他提更有难度的事情，比如潮汐，比如什么力量让地球转动，这样我就又要用到那些神秘的字眼了）。

这只是一个例子，说明抛出那些物理学名词和真正教科学的区别。那些物理学名词是必不可少的，我们反对的只是在第一堂课上就讲这些。学到后面肯定要引入这个名词的定义，告诉你什么是能量，而不是针对“什么让狗动起来的”这样简单的问题。面对孩子，我们应该给出符

合他们兴趣的答案："拆开它，我们来看看里面有什么。"

和父亲在树林里散步时，我学到了许多东西。比如看到鸟，他不会忙着告诉我鸟的名字，而是说："看，那鸟总在啄自己的羽毛。它老是在啄羽毛。你想想看，它为什么啄羽毛呢？"

我猜想："是羽毛乱了，它想把羽毛理顺。"父亲会问："那鸟的羽毛什么时候弄乱的？还有，它的羽毛为什么会弄乱呢？"

"飞的时候。它在地上走的时候，羽毛不会乱。但是飞的时候，羽毛就乱了。"

然后他会说："照你这么想，鸟刚刚落地时，就会去啄羽毛，而它理顺羽毛之后，在地上走来走去时，就不怎么啄羽毛。好，我们来看看。"

于是我们就过去看，仔细地观察。我观察到的结果是：鸟不论在地面上走了多久，它都会去啄羽毛，就跟它刚刚从空中飞下来时一样。

我猜错了，可是我真的猜不出真正的原因。这时候，我父亲就会告诉我答案：

那是因为鸟的身上有虱子。鸟的羽毛里会掉下来一些小皮屑，那东西是可以吃的，虱子就吃这东西。虱子身上有一点点蜡，那是因为虱子腿部的关节能分泌出这东西。在那里有一只非常小的虫子，它靠吃蜡生活。小虫子能有这么多的东西吃，最后导致它消化不良，因此它排泄出的液状物里就有很多糖分，还有一种微小的生物就靠这糖分生存，等等。

父亲所说的这些，虽然不完全正确，但是这种方法是对的。首先，我学到了"寄生"这个概念，一个生物靠另一个生物生存，这个生物再依赖另一种生物，一直有能依赖的对象。

其次，他接着说，在自然界，只要有可以吃的东西，能维持生命，不管它是什么东西，都会有某种形式的生物找到利用这种资源的方法，而且一点点吃剩的东西都会有别的生物来吃。

我要说的就是，即便观察后，我还不能得到最终的结论，可是，观察得到的结果就是一块金子，这是很有价值、非常神奇的结果。这确实很神奇。

你们假设一下，如果当初他要求我去观察，要求我拉一个单子，要求我把观察的结果记下来，去做这做那，还要去观察。而如果我真的列了这张单子，那么这单子会和其他130张单子一起被归档，放在一个笔记本的后面。如果是这样，我就会觉得那些观察的结果没什么意思，而且我从中也不会学到多少东西。

我认为有一点很重要—至少对我来说很重要：如果你想教导别人去观察，你得让他知道，通过观察他会发现美妙的东西。我就是在观察时懂得了科学是什么。科学需要耐心。如果你看了，你仔细观察了，你确实用心了，你会得到巨大的回报（虽然不是每次都会有这样的回报）。所以，当我更大一些的时候，我会不辞辛苦地研究问题，一个小时接着一个小时地工作，坚持数年如一日—有时一干就是很多年，有时候时间短一些。其中有很多工作都失败了，很多东西都进了废纸篓，但时不时会有灵光一现，问题有了新的突破，那是我童年时就懂得期待的东西—观察得到的结果。因为我知道观察是值得花费精力的。

顺便说说，我们在森林里还学到了其他一些东西。我们会出去散步，看到各种寻常的东西，还会谈论很多事情：我们谈论正在生长的植物，树木如何努力获取阳光的照射，它们如何努力生长得尽可能高，长到35英尺或40英尺以上时，它们如何解决吸收水的问题；我们还谈论地上的小植物寻找树荫间漏下来的一点点阳光，所有在地上长出来的东西，等等。

在我们看了所有这些以后，有一天，父亲又带我去了森林，并说："这段时间我们都在观察森林，但是这里正在发生着的事情，我们只看到了一半，正好是一半。"

我说："您这话是什么意思？"

他说："我们已经看到所有这些东西如何生长，但是每一点生长，一定要有等量的枯萎，否则资源就会被耗尽。如果枯死的树在耗尽了空气

和土壤中的物质之后，仍然立在那儿，它们没有腐朽败坏，就不能回归自然，树木里的成分就不能回到土壤或空气中去。这样的话，其他的植物就不可能生长了，因为土壤和空气中已经没有可吸收的物质了。”所以，每一点生长必须对应着等量的腐坏。

之后，我们又经常进树林散步。我们会刨开枯死的树桩，看见里面有趣的小昆虫和菌类正在生长—他当然不可能把细菌给我看，但是我们看到了物质被细菌腐化变软的样子。因此在我眼里，森林就是一个物质不断转化的地方。

父亲继续用自己奇特的方式给我讲了许多事情。他经常以这样的方式开头：“你想象一下，一个火星人要来地球看看。”这是观察世界一个很好的方法。比如在我玩电动火车的时候，他告诉我：“有一个大轮子，它被水冲着转啊转；它上面连着许多细铜线，这些细铜线伸向各个方向，一直往外伸啊伸啊；铜线上连着小轮子，大轮子转动的时候，所有的小轮子也跟着转动起来。大轮子和小轮子只是靠着铜（线）和铁（线）连接着，没有其他东西，没有那些转动装置。你转动一下这里的大轮子，这儿所有的小轮子也跟着转动起来，你的电动火车就好比是其中的一个小轮子。”父亲给我呈现的就是这么一个奇妙的世界。

…………

何谓科学，我想，它可能是这样一回事：在这个星球上，生命进化到了一个阶段，智慧生物出现了—不仅仅是指人类，也包括那些能嬉耍的动物，它们能从这些活动里学到一些东西（比如猫）。但在这个阶段，每个动物只能从自身的经历中学到东西。它们又渐渐进化，直到某些动物学习能力变得更强，不仅能更快地从自己的经历中学到东西，还能从别的途径学习，比如通过观察其他动物的经历，或是有别的动物给它亲身示范，或是它能够模仿另一个动物。于是就有了这样的可能性：所有的动物都可能学到这些经验，但是这种经验的传承没有效率，而且掌握这些经验的动物可能会死掉，至于学到了这些经验的动物，也许在它能够把经验传授给其他动物之前就死掉了。

问题是，有没有可能学得更快一些—学习的速度能超越遗忘的脚步？那些碰巧学到的东西，可能因为学习者的记忆力不好，也可能因为

学习者或发明者的死亡而被遗忘。

也许，就出现了这样一个阶段，某种动物的学习效率提高到了这样一个程度，突然之间整件事情有了一个崭新的面目：某个动物学会了一些事情，紧接着就传授给另一个动物，它再接着传授给下一个动物，它们传授知识的速度如此之快，足以使这些知识不会在这个种群内消失。于是整个种群的知识就有可能积累起来。

这种现象被称为世代累积性（time-binding）。我不知道是谁发明的这个词，不管怎么说，刚才说的那一个种群的动物，他们中的一些现在就坐在这儿，想把这个经验和那个经验结合起来，每一个都努力向另一个学习。

一个种群拥有自己种群的记忆，拥有代代相传积累起来的知识，这是自然界的一个新现象。但是，这也有一个弊端，因为有可能传递错误的东西—对这个种群没有好处的思想。这个种群有思想，但有些思想不一定有益。

于是我们又到了这么一个时期，思想非常缓慢地累积起来，不仅包含实用和有用的东西，还混杂着大量形形色色的偏见和千奇百怪的信仰。

后来，人们发现了一个避免这种弊病的方法。那就是存疑。人们不确定流传下来的东西是否真的正确，想重新亲自验证事情的真相，不想盲目相信学到的东西。这就是科学：经过重新检验的知识才是可信的，而不是一味相信前人留下来的知识。我就是这么看待科学的，这是我能给出的最好的定义。

为了提高大家的兴致，我想说说大家都很熟悉的事情。宗教人士传教的时候，他们不是对人们说教一次就完事的—他们要反复说教。我想，向人们传授科学知识也有必要这么做，运用不同的方法，孜孜不倦地激励人们学习科学，让大家记住科学的意义所在，不仅教孩子们，还要教成人，教每个人。我们这样做，不仅仅是为了让自己成为更好的公民，或者更有能力去控制大自然；我们这么做还有别的意义。

那就是学习科学造就了我们的世界观。我们重新验证知识，从中可以发现自然的美与神奇。也就是说，我刚刚向大家提到的那些事情的神奇和美妙：物体之所以运动，是因为阳光的照耀。这个说法很深刻，很奇异，也很美妙（当然，并不是世间万物的运动都是因为阳光的照耀。地球的自转就和阳光照耀无关，还有，近来的核反应也能产生能量，这是我们这个星球的新能源。另外，也许导致火山爆发的能量也与太阳能无关）。

学了科学之后，我们看到的世界就变得很不一样了。举个例子，我们知道树木生长的原料主要来自空气（中的二氧化碳），树木燃烧的时候，它们又被释放到空气中。而燃烧释放的热量，正是原先来自太阳的热量，它们曾在光合作用中起作用，利用空气（中的二氧化碳）形成树木（的有机养分）。最后剩下一小堆灰烬，它们不是来自空气的，而是来自土壤的。

这些都是很美妙的事情，科学的世界里到处是这些美妙的东西。它们很有启发性，也可以用来启发他人。

科学的另一个价值，就是倡导理性思考，它同样也倡导自由思考的重要性；怀疑前人教给我们的东西是否都是正确的，其成果就是理性思考。你一定要把科学和科学研究的形式或流程（后者有时能促进科学的发展）区别开来，尤其在教学中，你们老师一定要区分二者的不同。说出科学研究的流程，比如我们写（报告）、做实验、观察，等等，这个很容易，你完全可以照样画葫芦。拿宗教来说，过分注重形式却记不住宗教领袖最重要的教诲，原本伟大的宗教最终落得个支离破碎、分崩离析的下场。同样地，我们可能只注重科学（研究）的形式，还把它当作科学，实际上充其量也就是伪科学。如此一来，我们都尝到了苦头，现如今很多研究所的研究氛围很是沉闷，没有研究自由—这些机构都受到了伪科学顾问们的影响。

我们对教学做过许多研究，比如说，人们进行观察、记录和统计，但是这种行为并不是真正的科学研究，得到的结果也不是普遍获承认的知识。它们只是模仿了科学研究的形式—就好像南太平洋岛屿上的居民用木头建造飞机场和无线电发射塔，期望有朝一日一架大飞机会降落在

那里。他们甚至还造出了木头飞机，外形跟他们在周围国家的飞机场上看到的飞机一模一样，但是奇怪的是，这些飞机就是飞不起来！这种伪科学模仿的结果就是造就了很多专家，你们当中很多人就是专家。你们这些教师，真正从事基础教育的教师，时不时你们也可以怀疑一下专家。但是学习了科学精神后，你们必须怀疑专家。实际上，我还可以从另一个角度来定义科学：科学就是坚信专家也有无知的时候。

当一个人说“科学指导我们这个指导我们那个”，他说得不大准确。科学并不会教我们这些那些，那是经验在教导我们。如果他们对你说“科学已经表明……如此这般的”，你应该反问：“科学是怎么证明这个的？科学家是怎样发现这个的—怎样发现，发现了什么，在哪儿发现的？”能说明问题的不是科学，而是实验，实验结果才可以说明这个问题。你和其他人有同等的权利，在获取实验结果的基础上（但是我们一定要了解所有的实验证据），自己去判断：通过这个实验，我们是否已经获得一个可以被再次运用的结论。

在一个真正的科学还没有发展到一定地步的复杂领域，我们不得不依赖一种古老的智慧—绝对的坦率。我想鼓励从事科学基础教育的教师们，你们要乐观一点，对待常识要有一些自信，要有自己的头脑。你们要知道，指导你们的专家也许是错误的。

我或许已经破坏了教育秩序，将来考进加州理工学院的学生也许不会再这么优秀了。我认为，我们现在生活在一个没有科学的时代，几乎人们所有的交流、电视上的言论和书本，所有这些都充斥着不科学的东西。不是说那些内容不好，我是说它们是不科学的。于是，就出现了大量打着科学旗号的智力专制。

说到底，人不可能有来生。每一代人都会从自己的经历中发现一些东西，他们必须把这些发现传给下一代，但是这种知识的传递必须在继承和扬弃之间保持微妙的平衡，以免我们人类（现在人类已经知道自己容易犯以讹传讹的错误）把错误的知识强塞给下一代。但是我们人类确实把自己积累的智慧传递了下去，还有那些也许称不上智慧的“智慧”。

在传承先辈的知识这个问题上，我们很有必要教学生一种技能：如何在“取其精华”和“去其糟粕”两者之间保持一种平衡，这需要相当高超

的技巧。科学的各个学科门类在其发展过程中都有过这样的教训：认为先辈大师们字字珠玑、说的都是绝对真理，这样的信念是很危险的。

各位继续努力！谢谢大家！

9 世界上最聪明的人

这是科幻杂志Omni在1979年采访费曼的文字记录，这次采访很精彩，其间费曼谈了他最了解和最喜欢的物理学，也谈了他最不喜欢的学科—哲学（“哲学家应该学会自嘲”）。访谈中，费曼还谈到了为他赢得诺贝尔奖的研究—量子电动力学（QED）；接着他还谈到宇宙学、夸克以及那些令许多方程式陷入困境的烦人的无限大数值。

“我觉得，这个理论只是把困难扫到地毯下去了，当然，对此我也不能肯定。”这听起来好像是在某个科学论坛上，一篇有争议的论文宣读之后，听众发表的礼节性的、温和的批评。但是，这是费曼在诺贝尔奖颁奖典礼上发表的演讲。他质疑的正是自己的理论—量子电动力学，最近被誉为“人类发现的最精确的理论”。根据它做出的预测，经过实验证明，误差均在百万分之一的范围内。20世纪40年代，当费曼、施温格和朝永振一郎各自分别发现这个理论时，同行们为之欢呼，称之为“大扫除”—长期遗留的难题终于可以解决了，这个理论堪称20世纪物理学领域内两个伟大理论—相对论和量子力学—的完美结合。

在费曼的整个科学生涯中，他一直把自己理论方面的天分与不惧权威的怀疑主义精神结合在一起。1942年，费曼在导师约翰·惠勒的指导下，获得普林斯顿大学博士学位。之后，他被招进了曼哈顿计划小组。在洛斯阿拉莫斯，这个精灵古怪的25岁年轻人既不畏惧身边的物理巨匠（尼尔斯·玻尔、恩里科·费米、汉斯·贝特），也不在意这个顶级机密工程紧张严肃的氛围。他开保险柜的绝活令所有安保人员心惊肉跳—他能破解保险柜密码，或是靠辨听密码锁内部构件的细微运动，或是靠猜测保险柜主人会选择哪个物理常数做密码（从那以后，费曼一直没有改掉这个癖好，他在加州理工学院的很多学生，在跟他学物理的同时，也学到了开保险柜的绝技）。

战后，费曼去了康奈尔大学工作。如他在访谈中详细谈到的，正是由于贝特的启发，他才开始研究“无限大数值”课题的。在这之前的30年

间，氢原子电子的精确能级和电子之间的作用力（电子运动得太快了，必须考虑相对论效应）一直是物理研究的前沿课题。这个理论指出，每个电子周围都环绕着倏忽而逝的“虚粒子”，虚粒子的质能是在真空中积聚的，这些虚粒子又能吸引其他的虚粒子—结果形成一个数学意义上的无穷大的集合，这预示着每个电子都有无限大的电荷。1943年，朝永振一郎提出了一个能避开这个问题的新方法。几年后，他的想法才为人所知，而那时，几乎在同一时间段，费曼和哈佛大学的施温格也各自独立地在这个理论上迈出了决定性的一步。三个人因此分享了1965年诺贝尔物理学奖。那时，费曼的数学工具—费曼积分，以及他为研究粒子相互作用而发明的图表—费曼图，已经成为每位理论物理学家的必备工具。数学家斯坦尼斯劳·乌拉姆，另一位洛斯阿拉莫斯的老前辈，称赞费曼图是“一种能够推动思想发展的符号，它将被证明是有用的，甚至是别开生面和具有决定意义的”。举个例子，在时间中逆行的粒子这个想法就是从这套符号系统中自然衍生出来的。

1950年，费曼来到帕萨迪纳的加州理工学院任教。他说话仍然带有浓重的纽约口音，但南加州似乎真是一个适合他居住的地方。他的同事们津津乐道的“费曼故事”中，他对拉斯维加斯的痴迷以及他丰富的夜生活总是占了很大篇幅。“我夫人很难相信我真的会接受这个邀请，非得穿上燕尾服给人发表演讲，”他说，“我自己确实也反反复复改了好几次主意。”在《费曼物理学讲义》的序言里—自从1963年结集出版，这本书被广泛用作大学物理教科书—他的形象是敲着康加鼓，狂放地咧嘴大笑（据说在邦戈鼓上，他能够一只手敲10下，同时另一只手敲11下。你不妨试一试，也许你会觉得，相比之下还是量子电动力学容易一些）。

费曼的其他成就包括他对氦的超低温相变研究的贡献，以及他和加州理工学院的同事默里·盖尔曼32对原子核β衰变理论的研究。费曼指出，这两个课题距离其最终解决还有很长的一段路要走。他甚至毫不迟疑地把自己的量子电动力学称为“骗局”，因为它没能解决一些重要的逻辑问题。一个人能做如此高水准的科学研究，同时难能可贵地保持着如此敏锐的怀疑精神，这到底是什么样的一个人？继续读下去，您自然能找出答案。

Omni：对于圈外人来说，高能物理的目标似乎是发现物质的终极组

成成分。这种探索，我们似乎可以追溯到古希腊的原子，人称“不可分割的粒子”。但是，使用大型粒子加速器，你们可以得到比原先的粒子质量更重的粒子，也许你们得到的是不能再分割的夸克。这对于我们的终极探索来说意味着什么呢？

费曼：我认为不存在这么一种探索。哲学家们试图发现“自然如何运行”，他们可能随意谈论某种“终极粒子”，因为在某一特定时刻，大自然看上去正是这样的，但是……假设人们在探索一个新大陆，打个比方吧，他们看到水在地表流淌，之前他们见过这个，所以他们管这叫作“河”。接着，他们说自己要去探索，要去寻找河流的源头。他们逆流而上，确信这条河一定有源头，一切进行得很顺利。但是，你瞧，他们走了足够远，却发现整个水流系统跟他们设想的不一样：那儿是个很大的湖或是一些泉眼，或者那条河流成了一个大圆圈。你可能说：“啊哈，他们弄错了！”但是，完全不是那么回事！他们做这事的真正目的是探索这片陆地，如果事实证明那里没有河流的源头，他们可能会为自己之前的草率定论感到有点尴尬，但也仅此而已。只要事物的构成形式像是一环套一环，你就要去寻找最里面的一环，但是，也许不是这么回事，这种情况下，你要弄清楚的是“自己到底要找什么”。

Omni：但是，对你自己会发现什么，你肯定有一些预期，那儿一定会有山梁和山谷，诸如此类的……

费曼：是这样。但是，也有这种可能：你到了那里，发现到处云雾缭绕，怎么办呢？你预料会看到一些东西，你也能够研究出水源分布的地质学原理，但是当你发现那里只有一团云雾，或许，还有露水，但是在这一片云雾中你没法看清陆地，怎么办？出发时的想法全部被颠覆了！这样刺激的事情经常会发生。如果一个人自说自话：我们要去找终极粒子，或者统一场定理，或者其他特定的东西，那他就有些自以为是了。最终结果出乎意料，科学家甚至可能更高兴。你想，他会说这样的话吗？ “噢，这不是我想的那样，没有所谓的终极粒子，我不想再研究这个了。”不是这样的，他会说：“那么，这到底是什么东西呢？”

Omni：您宁愿看到这种情形吗？

费曼：个人偏好对事情没有什么影响：我找到的都是我（想）找到

的。你也不能说事情总是会出人意料。几年前，我非常怀疑规范场论[33]的正确性，部分原因是我原本以为核子间强作用与电动力学的区别要更大一些，但是现在看来并非如此。我原本希望看到的是一片大雾，可是，现在我看到的更像是山梁或山谷。

Omni：物理学理论会继续变得越来越抽象、越来越数学化吗？现在的理论物理学家，有没有可能像19世纪早期的法拉第那样，没有很深的数学造诣，在物理学方面却有非凡的直觉？

费曼：我认为可能性很小。首先，你必须借助数学理解现有的物理学知识。此外，对于我们的大脑在进化中形成的能力而言，亚原子核体系的行为还是太奇怪了。对它的分析必须非常抽象：为了理解冰，你必须理解那些与冰完全不同的东西。法拉第的模型是跟机械相关的—弹簧、电线和三维空间里扯紧的带子—而且他的“像”来自基础几何学。我认为，从他这个视角，我们已经理解了所有能理解的东西，而我们本世纪发现的东西很不一样，非常难以琢磨，（物理学）要更进一步发展，很多地方都需要用到数学。

Omni：这会把很多人挡在物理学大门外吧—只有少数人研究物理，很多人甚至不能理解目前的物理学研究，是这样吧？

费曼：也许有人会想出一套思考问题的方法，帮助我们更容易地理解那些问题。或许他们只是让学生学物理的时间不断提前。其实，那些所谓“深奥”的数学并不是真的那么难。拿计算机编程来说，它需要严密的逻辑—过去，父母们会说，这种逻辑思维只属于教授，但是现在，它已经成为日常生活的一部分，成了一种谋生手段。孩子们迷上了计算机并且人手一台计算机，他们正在用计算机做最疯狂、最美妙的事情！

Omni：……现在每个火柴盒上都有编程学校的广告呢！

费曼：对。我不认同那样的观点，说什么只有少数天才能够弄懂数学，其他人都是智力一般的人。数学知识是人类发现的，它不会比人脑能理解的东西更复杂。我有一本微积分书，上面说：“一个傻子能做的事情，另一个傻子也能做到。”我们研究大自然取得的成果，在不搞这些研究的人看来，也许很抽象、很吓人，但是，这也算是一群“傻子”做的事

情，过几十年，我们的下一代，所有这些“傻子”都能够把这些东西弄懂了。

在这些问题上，人们有一种浮夸的倾向，总爱把东西弄得深奥莫测。我儿子选修了一门哲学课，昨天晚上我们一起看斯宾诺莎的著作—里面那个推理再幼稚不过了！满眼都是属性、物质这些字眼，翻来倒去地说，无聊透了。我们看着看着就笑开了。呃呃，我们怎么能这样做呢？这个荷兰人可是一位伟大的哲学家，而我们竟然嘲笑他。但是，他做这种研究纯粹是空穴来风！与他同一时代的有牛顿，有研究血液循环的哈维，他们这些人用分析的方法推动了科学的进步！而你随便挑上斯宾诺莎的一个命题，再得出一个相反的命题，然后反观这个世界—你根本无法判断哪一个命题是正确的。确实，这些人令人敬畏，因为他们有勇气去研究这些艰深宏大的问题，但是，如果这些问题研究了也没有什么结果，你空有勇气也是白搭。

Omni：在您已经发表的演讲稿里，对于哲学家对科学的评论，您的态度很不以为然……

费曼：招惹我的不是哲学，而是他们夸夸其谈的态度。如果他们只嘲笑自己，如果他们能说：“我觉得这事情是这样的，但是冯·莱比锡认为它是那个样子，他的想法有可能是对的。”如果他们能说：“这是我们最合理的猜测……”这样的话，我对他们就不是这个态度了。但是，他们几乎没有人这么做。相反地，他们抓住一种可能性，也就是“世界上也许没有什么终极的基本粒子”，然后对科学家指手画脚：“你们应该停止手头的工作，你们想问题要深刻一些。”“你们的思考不够深入，我先给你们定义一下这个世界吧。”可是我压根儿不打算要什么定义，我直接就去探索这个世界了。

Omni：您是怎么确定该主攻哪一个研究课题的？

费曼：我读中学的时候，就有了这样一个思路：你要把一个问题的重要性乘以你解决这个问题的可能性。你也知道，一个技术控的孩子是个什么样子，他喜欢办事有效率……总之，如果你能够把这些因素有机结合起来考虑，你就不会在一个重大的课题上浪费时间、一无所获，或者把生命浪费在解决一大堆别人也能解决的小问题上。

Omni：我们来谈谈让您和施温格、朝永振一郎一起获得诺贝尔奖的那个问题吧。三种不同的方法。在那个时候，解决那个问题是水到渠成的一件事吗？

费曼：20世纪20年代后期，就在量子力学出现后不久，狄拉克等人提出了量子电动力学。他们的理论基本是正确的，但是当你想进一步计算结果时，你就会碰到很复杂的方程，很难解决。你可以得到一个不错的一级近似值，但是当你想进一步修正它时，这些无限大的数值就开始冒出来了。这20年来，所有量子理论的书后面都会提到这个问题。

后来，通过兰姆34和雷瑟福35的实验，我们知道了氦原子的电子能级跃迁这么一回事。直到那个时候，粗糙的量子电动力学的理论还是管用的，但是现在你有了一个非常精确的数据：1060兆赫兹什么的。于是大家都说，该死，一定要解决这个问题不可……他们早就知道那个理论有问题，现在又有了这么一个非常精确的数据。

于是，汉斯·贝特利用这个数据试着做了一些计算，也就是估算消除这个效应对那个效应的影响，以此避免那些无限大的数值。结果发现，那些可能发展为无限大的数值会停下来，而且它们可能在这一量级上停止，他得出的结果是大概在1000兆赫兹时停止。我记得，他邀请了一些人去他家中聚会，在康奈尔大学，但是中途他被一个电话叫走了，有人找他咨询一些事情。聚会继续进行，中间他打电话给我，说他在火车上已经把数值计算出来了。回来以后，他专门做了一个演讲，解释为什么这个消除步骤能够避免无限大数值，但是还是很牵强、很混乱。他说，希望有人能够彻底解决这个问题。我后来去找他，我说："噢，这个容易，我能做。"当时，我还是麻省理工学院大四的学生，从那时起，我就开始琢磨这个问题了。当时，我甚至还整出了一个答案—当然，是错的。你看，这就是我、施温格和朝永振一郎在这个问题上的切入点—找出一种方法把这种过程转变成严谨的分析，而且自始至终严格保持相对论不变性。朝永振一郎已经提出如何解决这个问题的思路，与此同时，施温格也找到了自己的路子。

于是，我带上自己的想法去见贝特。有意思的是，我那时根本不知道怎么计算这个领域里最简单、最基础的问题—我早就应该学这些，但

是我当时忙着搞自己的理论—所以我不知道怎样去验证我的想法是否行得通。我和贝特一起在黑板上演算，最后发现不行，甚至还不如以前的方法。回去后，我再三苦想，最后下决心一定要学会计算例题。我就去学了，然后再回去找贝特。我们试了一下，这次行了！直到现在，我们也没想明白第一次出错的原因……可能是一些很愚蠢的错误。

Omni：这耽搁了您多长时间？

费曼：时间不长，大概也就一个月。这对我也有好处，因为我重新检查了自己的思路，让自己坚信这个方法肯定行得通，而且我发明的那些图真的不错，一目了然。

Omni：那时，您想过这些吗—有一天它们会被称作“费曼图”，还被收进教科书？

费曼：不，没想到—不过，我确实记得有这么一件事。我穿着睡衣在地板上工作，身边铺满了纸，上面是那些滑稽的一团团的斑点串成的图，还有一些线条伸出来。我自言自语：假如这些图真的有用，其他人开始使用它们，《物理评论》不得不印刷这些可笑的图片，这不很滑稽吗？当然，我没有能力预测这些—首先，我完全不知道这些图有多少张会出现在《物理评论》上；其次，我从未想过，如果每个人都用它们，它们就不会显得滑稽了……

[这时，访谈地点改到费曼教授的办公室。在那里，磁带录音机突然不能工作了，检查了电线、电源开关、录音键，都没有问题。费曼教授建议把磁带先拿出来，然后再放进去试试。]

费曼：看，你一定要知道这些东西是怎么一回事。物理学家就很了解这世界上的东西。

Omni：把它拆开，然后再装起来？

费曼：是。总是会有一点灰尘，或者无限大数值什么的。

Omni：我们接着说。您在演讲中说，我们（原先）的物理学理论能很好地解释各种各样的现象，然后X射线、介子或其他东西出现了，于

是“到处都是线头”。在今天的物理学中，您看到了哪些松脱的线头？

费曼：噢，比如粒子的质量：规范场论给出了粒子间相互作用的漂亮模型，但是没有解释粒子的质量，而我们需要理解这一堆没有规律的数字。对于强相互作用，我们有色夸克[36]和胶子理论，非常精确，也很全面，但是几乎没有什么过硬的预测。在技术层面，对这个理论进行检验非常困难，这是一个挑战。我强烈感觉那就是一个松脱的线头，虽然目前没有证据否定这个理论，可是，除非我们有过硬的数据来检验过硬的预测，否则我们不可能有很大的进步。

Omni：您对宇宙学有什么看法吗？狄拉克指出，基础常数会随时间改变，这是否意味着现在的物理学定律跟宇宙大爆炸时的有所不同？

费曼：说到这个，就要聊很多问题了。到目前为止，物理学一直想发现大自然的法则和常数，而不去问它们从哪里来，但是现在我们也许到了不得不反思历史的时刻了。

Omni：您对此有什么建议吗？

费曼：没有。

Omni：一点儿也没有？也没有一点儿倾向？

费曼：真的没有。对每一件事，我几乎都是这个态度。之前，你没有问我是否认为存在一种基本粒子，或者它是不是根本就是一个谜。如果你问我这个问题，我会告诉你，我对此毫无看法。那么，为了能够努力研究某个东西，你不得不让自己相信有一个答案就在那儿，这样你就会努力钻研。是吧？所以你要让自己有个偏向或者做个假设，但是整个过程中，你内心深处其实在嘲笑自己。忘掉你听到的那些“科学无偏见”的话吧！今天的这个采访，谈到宇宙大爆炸，我是不带偏见的，但是在我工作的时候，我有许多偏向。

Omni：您有什么样的偏向……？对称性，简单性……？

费曼：这要看我当天的心情如何。有一天我会坚信某一种大家都相信的对称，第二天我又想去弄明白：如果不是这样，那又会是什么结

果，是不是除我之外，其他人都错了。但是一个称职的科学家与众不同的地方，就在于他们不管做什么事，都不像其他人那样过分相信自己。他们有坚定的怀疑精神，而且安之若素，他们总是想着“可能是这样”，并且依此行事，他们时时刻刻都明白这仅仅是“可能”。许多人觉得这很难，他们认为这意味着超脱或冷漠。这不是冷漠！这是一种更加深刻、怀有更多热情的求知之路。这好比你正在一个自以为能够找到答案的地方挖呀挖，然后有人跑过来喊：“你没看到他们在那边挖出的东西吗？”你抬头一看，叫道：“啊呀！我挖错地方了！”这种事情总是在发生。

Omni：还有一种情况，好像在近代物理学历史上也经常发生：很多先前的“纯”数学，现在却发现它们能应用到物理学中，例如矩阵代数或群论。是现在的物理学家比他们的前辈更善于接受新鲜事物还是滞后的时间越来越短了？

费曼：从来就没有什么滞后时间。拿汉密尔顿37的四元数来说：物理学家抛弃了这个强有力的数学系统的大部分，只留下其中的一部分—从数学上讲几乎是微不足道—这一部分后来变成了向量分析。但是当量子力学需要四元数的全力支持时，泡利38立即就用一个新的形式改造了这个系统。你现在回过头，说泡利的旋转矩阵和算子没什么大不了，起作用的是汉密尔顿的四元数……但是即便物理学家已经把这个体系牢记了90年，其意义和记几个星期也没有太大的不同。

比如你得了病，韦格纳肉芽肿或其他什么病，你会自己去翻医学方面的书。然后你就会发现，你比你的医生还了解这病，虽然他在医学院学了那么长时间……你明白了吗？学习某个特定的、小范围的课题，要比学习整个学科领域容易得多。数学家们是在全方位探索。而对于一个物理学家来说，只学习他需要的东西就行了，这要比学习所有可能有用的知识要快一些。我前面提到的那个问题—夸克理论里的方程难题，它是物理学家面临的问题，我们想要去解决它。要解决这个问题，我们可能就要去钻研数学问题。这其中有一个令人吃惊的事情，我不理解的是，在群论用在物理学之前，数学家们就已经开始研究它了，但是考虑到物理学的发展速度，我认为他们的研究并不真的那么重要。

Omni：再问一个您演讲中提到的问题。您曾说："在下一个唤醒人类智慧的伟大时代，可能会出现一种方法来理解方程的实质内容。"请问这句话有什么含意吗？

费曼：那一段话，我说的是薛定谔39方程。现在，你们可以从这个方程中得到分子中的原子键合和化学价，但是你看这方程的时候，你看不到化学家们熟知的丰富现象，也得不出这样的观点，即"夸克是永远连接在一起的，所以你不可能得到一个独立游离的夸克"—也许你能做到，也许不能，但问题的关键是，当你看着这个被认为能够描述夸克行为的方程时，你不明白夸克为什么应该是这样的。看着这个描述水中原子和分子力的薛定谔方程时，你看不到水的活动形式，你也看不到湍流现象。

Omni：这就让不少人被湍流现象困扰—气象学家、海洋学家、地质学家和飞机设计师，多多少少都在这个问题上陷于困境，是吧？

费曼：绝对是这样的。也许就是处在这种困境的一个人，他被这个问题折磨得不行，于是他就想办法去解决这个问题，这个时候，他就在做物理研究。湍流问题，不仅仅是"物理学理论只能解决简单问题"的一个例证—我们对它简直就是束手无策。我们根本就没有好的基础理论。

Omni：也许这跟教科书的论述有关，可是，不搞科研的人们几乎不知道，一碰到复杂的、真正的物理难题，现有的物理学理论立马就歇菜。

费曼：现在的教育很差劲。当你在物理界有些资历后，你才能明白：在物理研究领域，我们能做的只是其中很小的一部分。我们的理论真的很有局限性。

Omni：物理学家从一个方程看到它的实质内涵的能力相差很大吗？

费曼：噢，是的—没有人特别擅长这个。狄拉克说过，理解一个物理问题意味着不靠解方程就能看到答案。也许他说得夸张了一些，也许解方程会帮助你更好地理解—但是在你能真正理解之前，你只是在解方程。

Omni：作为一个教师，为了鼓励学生培养这种能力，您会怎么做？

费曼：我不知道。我没有办法判断学生对我讲的课到底理解了多少。

Omni：研究科学史的历史学家会不会有一天去追踪您学生的科学生涯，就像有人研究了卢瑟福、尼尔斯·玻尔和费米的学生那样？

费曼：我觉得不会。我一直对我的学生很失望，我这个老师都不知道自己在干什么。

Omni：但是，我们可以说说另一种影响。呃，您可以回想一下汉斯·贝特或约翰·惠勒对您的影响……

费曼：那倒是。但是我不知道我受到了什么影响。也许这只是我的个性使然，我真的不知道。我不是心理学家，也不是社会学家，我不知道怎样去弄懂一个人，包括我自己。你也许要问：这个家伙怎么能教学生？如果他都不知道自己在干什么，他怎么可能有教学的热情？但事实是，我热爱教学。在我向学生讲解一些问题的时候，说不定就会想到用新的方式去看待这些事物—我很喜欢这样，这样能把它们解释得更清楚，但是也有可能，我没能把它们讲得更清楚。我可能只是在自娱自乐。

我已经学会了接受自己的无知。我不一定非要成功做些什么不可，正像我以前谈论科学的时候说的那样。我认为我的生活更充实了，那是因为我认识到了：我不知道自己在做什么。我很高兴看到这个大千世界。

Omni：刚才我们回到办公室的时候，采访中断了一会儿，您和别人讨论您将要做的一场关于色觉的演讲。那个演讲和基础物理实在不搭界，不是吗？生理学家会不会说您“越界”了？

费曼：生理学？对色觉的研究只限于生理学吗？你看，只要给我一点儿时间，我就能做一场演讲，来探讨生理学的任何一个课题。研究这个问题，彻底弄懂它，我做得兴致勃勃，因为我向你保证，这么做很有意思。我什么都不懂，但我确信，只要你钻研得足够深入，每一件事情

都很有意思。

我儿子也是这样，可是他的兴趣比我在他这个年纪要广泛得多。他感兴趣的事情有魔术、计算机编程、教派的早期历史、拓扑学等—噢，他麻烦了，这世上有那么多有趣的事情。我们喜欢坐下来随便聊聊，我们会谈到事情可能的结果与我们希望看到的差距有多大。举个例子，我们说到登陆火星的海盗号火星探测器，我们会畅想，火星上有多少种可能存在的生命形式是这个设备发现不了的。是的，他很像我，所以我至少把“每一件事情都很有意思”这个观点传给了一个人。

当然，我不知道这算不算是一件好事……你懂我的意思吧？

10 货拜族科学：探讨科学、伪科学以及学习如何不自欺

1974年在加州理工学院毕业典礼上的演讲

问：巫医、超感知觉、南太平洋岛民、犀牛角和威臣牌食用油，这些和大学毕业典礼有什么关系？

答：这些都是幽默多智的费曼在演讲时举的例子，他劝诫毕业生：坚持科研诚信比世界上所有的奖赏和暂时的成功都更有意义。在这场演讲中，费曼顶着同行的压力，不顾科研资助机构的怒火，面对加州理工学院1974届毕业生畅谈科研诚信。

中世纪充斥着各种各样不靠谱的想法，比如一片犀牛角能够增强性能力（中世纪的另一个不靠谱的想法跟我们今天戴在头上的这些帽子有关—对我来说，这帽子太大了）。后来人们发现了一个鉴别这些说法的方法—他们的做法是，试验一下某种说法，看它是不是灵验，如果行不通，就不再去信它。自然，这种方法逐渐演变成了科学，而科学一直在进步，所以我们现在身处科学时代。在这样一个时代，我们很难理解一件事：既然巫医的建议根本不管用—或很少管用，它们在那个年代为什么还能存在呢？

但是，直到现在，我还是会碰到很多人，他们迟早会把话题带到飞碟、占星术或者某种神秘主义上，比如拓展意识、新形式的感知、超感知觉等。所以，我得出一个结论，现在并不是一个科学的时代。

大多数人会去相信许许多多神奇的事情，于是我决定去研究他们为什么会相信这些。我的好奇心驱使我去调查，结果却让我很为难：我发现了太多荒谬的事情，可是在今天的演讲里，我不能一一说给大家听。我都被它们弄得晕头转向了！首先我去调查形形色色的神秘主义和神秘体验。我进入密闭的箱子（里面漆黑一片，很安静，人漂浮在泻盐溶液

里），在里面经历了长时间的幻觉，所以我对这个有所了解。然后我去了伊莎兰40，那个地方盛行这些神秘主义的思想（那是个好地方，你们应该去玩一趟）。我被那些事情弄晕了，我不知道那种思想到底泛滥到了什么程度。

举个例子，我在一个澡堂里，里头还有另外一个家伙和一个女孩子。那人对女孩子说："我正在学习按摩，能不能拿你练练手？"女孩说可以，于是她起身躺到一个台面上。那个家伙从她的脚开始按摩—他按摩她的大脚趾，还揪着它转动起来。然后，他转身问一个人—很明显是他的老师："我摸到这个地方凹了进去，这是垂体吗？"女孩说："不，垂体摸起来的感觉不是这样的。"我插话了："伙计，你离垂体还远着呢。"他们一齐转头朝我看—你看，我装不下去了—她说："这是反射疗法。"于是我闭上了眼睛，装出沉思的样子。

这只是让我发晕的一个例子而已。我还考察了超感知觉（ESP）和超心理学（PSI）现象。当时最火的是有一个叫尤里·盖勒的人，据说他用手指摩挲一下钥匙，就能把钥匙弄弯。于是，应他的邀请，我去了他在宾馆的房间，想亲眼看看他演示读心术和弄弯钥匙。他没能成功地看出我的心思，我想，没有人能看穿我的想法。然后我儿子拿着一把钥匙，盖勒用手指摩挲着钥匙，但是钥匙没有任何反应。他又跟我们说："在水里做的效果会好一些。"你可以想象一下，我们都站在浴室里，水龙头打开了，钥匙浸在水里，他再用手指去摩挲钥匙。还是不行！所以我也就没有办法研究那些现象了。

我就开始思考，还有什么其他我们坚信的事情（它们同样经不起考验）？我想到了巫医，要检验他们的说法实在太容易了，只要注意到没有起任何作用就行了。我还找到了一些更多人深信的事，比如我们知道的一些教育方法。学界有很多人在研究阅读教学法和数学教学法，但是如果你留意一下，你会发现，即使我们一直请这些人来改进教学方法，学生的阅读成绩还是在持续下降—或几乎没有提高。这就像巫医开出的方子一样。这个问题应该探讨一下，他们怎么就知道自己这些教学方法一定有效？另一个例子是如何改造罪犯。很明显，我们没有取得什么成效—我们有许多理论，我们运用这些方法来改造罪犯，想借此减少犯罪，但是它们没有起作用。

然而，这些事情据说很科学。我们要研究它们。我觉得，那些有常识的普通人被这种伪科学吓唬住了。一个教师，他在如何教学生阅读方面有一些很好的想法，但是迫于学校的压力，他不得不采用其他一些方法—或者，由于受到教育体系的蒙蔽，他甚至开始怀疑自己的方法并不一定是个好方法。再者，一些坏孩子的父母，他们会因为曾经使用各种方法管教他们的孩子，余生都有负罪感，因为照专家们的说法，他们没有做“正确的事情”。

所以，我们确实应该仔细检验那些行不通的理论，那些不是科学的“科学”。

我想找到一个判断标准，用它来发现更多的这类东西，最后我得到了以下这条标准。鸡尾酒会上，女主人走过来说：“你们这些人怎么说话三句不离本行？”或者你太太上来说：“你怎么又招惹小姑娘了？”如果你对这样的话并不反感，那么你可以肯定，你是在谈论一件别人一无所知的事情。

用这个方法，我又发现了几个我差点忘了的话题—包括各种各样心理疗法的效力。于是我开始泡图书馆调查……我有太多的东西要讲给大家听，可是在这一次演讲里也讲不完。我就说几件小事。我要集中说说几件大家比较相信的事情。也许，明年我会就这些主题做一系列演讲。这还会花很长的时间。

我认为，刚才提到的教育和心理学研究的例子，我想把它们称作“货拜族科学41”。在南太平洋群岛，有一群人被称为“货拜族”。“二战”期间，他们看到飞机降落在岛上，飞机带来了很多好东西，现在他们希望那样的好事还会发生。于是他们想办法铺设了一条像跑道一样的东西，并在两旁生了火，又做了一个小木屋，让一个人坐在里面，头上套了两块木头，像是头戴式耳机，上面还有些竹条，像天线一样支棱着—那人相当于飞机调度员。然后他们等待飞机降落。他们把每一件事都模仿得很好，看上去很像那么一回事，和他们以前看到的一模一样。但是，这没有用，没有飞机会降落。我把这些东西叫作货拜族科学，因为它们遵循科学研究的所有规则和形式，但是它们独独没有核心的东西，你也看到了，飞机并没有降落。

当然，我应该告诉你们：他们遗漏了什么。但是这很困难，就像给南太平洋岛民解释他们必须怎么做才能获得物资一样困难。这不是告诉他们怎样去改进耳机形状那么简单的事。但是我注意到一点货拜族科学普遍缺乏的东西。那是一种理念，是我们都希望你们在学校学习科学课程的过程中能学到的理念—我们从未明确说过它是什么，而只是希望你们在科学研究实践中领悟它。我现在把它亮出来，公开谈论它，这很有意思。它可以说是科研诚信，是科学思考的一个原则，与绝对的诚实相对应—某种矫枉过正的态度。举个例子，假如你在做一个实验，你应该记录所有的东西，即使那些你认为可能导致实验失败的数据或现象—而不是仅仅汇报那些你认为有利的东西：能够解释你实验结果的其他原因，你考虑到并且通过借鉴别人的实验消除了的其他因素，以及这些因素是怎样干扰实验的—要确保其他研究人员清楚它们已经被排除掉了。

某些细节可能会否定你对实验结果的解释，如果你知道这些情况，就一定要写到报告里。如果你知道某种情况是完全错误的，或有可能是错的，你一定要尽你所能去解释它。举个例子，你提出了一个理论，你要宣传推广它，或者公开发表，你必须记下所有可能否定它的事实，就像你记下那些能证明这个理论的事实那样。这儿还有一个更微妙的问题，当你把很多想法放在一起合成一个精妙的理论，当你使用事实来证明这个理论时，你一定要明白，不能仅仅靠让你得出这个理论的那些事实，顺便说一句，那些失败的理论也会帮助人们得出正确的结论。

总而言之，科研诚信这一理念要求你公布所有的信息，这有利于其他人判断你的科研贡献的真正价值，而不只是提供那些将人引向某个特定方向的信息。

要解读这一理念，最容易的办法是做个比较。比如，和广告做个比较。昨晚我听到一句广告语，说威臣牌食用油不会渗到食物中去。好吧，那是真的，不能说这个广告欺骗消费者。但是，我现在谈论的不是“诚实”的问题，而是“科研诚信”这个问题，这是另一个层次的问题。那个广告应该加上一句事实描述，而事实是这样的：在某一个温度下，任何一种油都不会渗入食物，但是在另一个温度下，所有的油都会渗入食物中—威臣牌食用油也不例外。所以你看，这个广告只把部分事实告诉消费者，而不是全部事实。而这两者的区别需要我们出面澄清。

我们从实验中一定会得到真理。其他研究者会重复你的实验，他们会发现你到底是对还是错，自然界的现象也会证明或者否定你的理论。而且，即便你可能得到短暂的名望，兴奋激动一时，但是，如果你没有努力地以十分谨慎的态度去做这项工作，作为科学家，你就不可能得到良好的声誉。这种诚信、不自欺的谨慎，很大程度上正是大多数货拜族科学研究所欠缺的。

当然，他们的困难大部分在于研究课题本身很难，而且选用的科学研究方法并不适用于该课题。然而需要指出的是，这不是唯一的困难。那就是飞机没有来的原因—它们就是不来。

至于如何应对某些自我欺骗，从过往的经历中，我们已经学到了很多。举一个例子，密立根（Milliken）曾经用油滴实验测量电子电量，他得到了一个结果，而这个结果在我们现在看来，不是很准确。因为他使用了错误的空气黏度系数，所以他得到的结果有点问题。回顾一下在密立根之后研究者测量电子电量的历史，你会发现这很有意思。如果你以时间为横轴，把它们绘制成一个图，你会发现，下一个实验的结果比密立根得出的数值大一点，再下一个实验数值比这个实验数值又要大一点，下一个又大一点，直到最终得到一个比较高的数值。

为什么他们没有立即发现新得到的数值比密立根的数值高一些？这是让今天的科学家们感到羞愧的一段历史—很显然，当时的人们是这么做的：如果他们得到的数值远高于密立根的数值，他们就想肯定是哪里出错了—于是他们就会去寻找原因，并且找出一个理由，以此解释可能是某个地方出错了。可是，如果他们得到的数值与密立根的数值比较接近，他们就安心了。于是，他们会删掉那些跟密立根的数值相差较大的数值。他们做其他的实验也是如此。对于这种伎俩，我们今天已经心知肚明，我们自己也不会犯这种毛病了。

历经漫长的岁月我们才学会如何不自欺—学会拥有绝对的科研诚信，但是很遗憾，就我所知，现在还没有哪一门课程会专门开辟几节课传授这个经验。我们只能寄希望于你们自己在耳濡目染中领会它。

第一条原则就是你绝对不能欺骗自己—你自己是最容易欺骗的对象，所以你要非常当心。做到不自欺之后，不去欺骗其他科学家就容易

了。从那以后，你就只需要做到传统意义上的诚实就可以了。

我还要补充一点，虽然对科学家来说，这一点说不上是至关紧要的，但是我个人觉得很重要—那就是，身为科学家，在和人交谈时，你不能愚弄外行人。我在这儿说的不是欺骗太太或是女朋友，或者这一类的事情，那种情况下，你们不是科学家的身份，而是一个普通人的身份—那些问题就留给你自己和你们的拉比42吧。我现在讨论的是一种特殊的、有很高要求的诚信，不仅仅是“不撒谎”，而是退一步坦白说：作为一名科学家，自己也有可能犯错。这是我们身为科学家的担当，也是对其他科学家的责任，而且，我想，这也是对外行人的责任。

我举个例子。有一次，一个研究宇宙学和天文学的朋友在上电台做节目前对我说，他不知道该怎样向听众介绍自己工作的实用价值。“噢，”我说，“这没什么用。”他说：“是啊。但是这样说的话，我们就拿不到经费做更多的研究了。”这让我有点吃惊。我觉得这也是一种不诚实的表现。如果你以科学家自居，你就应该向外行人解释你做的事情是什么—这样的话，如果他们不想资助你，那也是他们自己的决定。

就这个原则而言，我再举一个例子：如果你下定决心要去验证一个理论，或者你想解释一个观点，你就应该让人们知道这个结论是怎么得出的。如果我们只公布某一种结果，可能会让论证过程看起来漂亮一些。可是，正反两种结果我们必须都公布。比如说—我们再举一个广告的例子，假设某种香烟有一些特性，比如尼古丁含量低。烟草公司对此大肆宣传，他们对大众的暗示就是“这种香烟对健康有益”—他们不会说“仅仅是焦油含量不同”，或者“香烟里使用了其他替代物”这样的话。换句话说，广告根据要传达给消费者的信息选择向大众公布什么内容。而我们不应该这么做。

我还要说，在向政府提供某些建议时，这种诚实的品质也很重要。假设有一名议员向你征求意见，问是否应该在他这个州钻井开采石油，而照你的判断，别的州更合适一些。如果你不直言相告，那么在我看来，你并没有给出科学的建议。你只不过是被别人利用了。如果你的看法正好是政府或政客们希望听到的，他们就会利用它证明自己的意见是正确的；而如果你的看法与他们相反，他们根本就不会把它公布于众。

这样根本算不上什么科学的建议。

还有一些错误是伪科学更本质的特点。我在康奈尔大学的时候，经常和心理系的人聊天。有一个学生告诉我，她想做这么一个实验—我记不清细节了，大致是这样，有人发现，在某种特定环境X下，老鼠有A行为；而她想知道，如果她把实验环境换成Y，老鼠是否仍有A行为？因此，她的实验目标是在Y环境下做实验，看看它们是否仍然有A行为。

我跟她解释，首先很有必要在她的实验室里重复别人已经做过的实验—在X条件下做实验，看看是否也会出现结果A；然后再把条件改为Y，看结果是否有变化。这样一来，她就能知道两个实验的区别是否真的就是她以为的那样。

听到这个建议，她很高兴，于是就兴冲冲地去找她的导师。然而导师的回答是："不行，你不要那样做，因为别人已经做过那个实验了，你再做一次就是浪费时间。"这事发生在1935年前后，当时好像已经有了这样的惯例，不要重复做心理学实验，只需要改变实验条件，再看看会发生什么情况。

现在，同类事情仍然有可能发生，甚至在大名鼎鼎的物理学领域也会出现这样的事情。当我知道有人在国家加速器实验室的大型加速器上做的一个实验后，我很震惊。那人做了一个重氢的实验，为了比较他的重氢实验结果与轻氢实验的结果，他引用了别人的轻氢实验数据，而那个轻氢实验是在另外一台设备上做的。当别人问他为什么这么做时，他的解释是：在这个项目里，他没有时间（因为时间很紧，使用的这台设备又很昂贵）做轻氢实验，而且再做一次实验也不可能有什么新成果。国家加速器实验室的主管很渴望出新成果，这样他们就可以争取更多的资金来开展公关活动。他们或许正在生生毁掉实验本身的价值，而实验才是设立实验室的真正目的。在那儿做实验的人通常很难按照科研诚信的要求去做他们的本职工作。

然而，也不是所有的心理学实验都是上述这种做法。比如，之前有很多实验让老鼠穿过各式各样的迷宫—可是很少有明确的实验结果。但是，在1937年，有个名叫"杨"的人做了一个很有趣的实验。他做了一个迷宫，是个长长的走廊，老鼠可以从走廊一侧的门进来，走廊另一侧的

门后则藏着食物。他想看看他能不能训练老鼠进入特定的一扇门—从放它们出来的那个门算起的第三扇门，不管它们是从哪个门出来的。实验结果证明不行。老鼠径直走向上次实验找到的有食物的那个门。

问题是，老鼠怎么知道这就是以前的那扇门？整个迷宫走廊造得那么好，每扇门都几乎一模一样！显然，这扇门有与众不同的地方。于是他把所有的门都很仔细地油漆了一遍，这样一来，门表面的纹理就没有什么区别了。但是老鼠还是能够找到那扇门。于是，他想，也许是老鼠闻到了食物的气味。所以每次老鼠走迷宫后，他就用化学药品覆盖之前的气味。可是，老鼠还是能找到那扇门。于是，他又想，老鼠可能是通过实验室的灯光和摆设来辨别位置的，就像所有有知觉的人一样。所以他就把整个迷宫走廊用东西蒙上，结果还是一样。

最后他总算发现了，老鼠是根据它们奔跑时地板发出的声响来做出判断的。所以，只要在那个迷宫走廊上铺上沙子，一切就搞定了。就这样，他把所有可能的线索一一排除掉，最后终于能够瞒过老鼠，让它们不得不学会走进第三扇门。如果他对实验条件的控制稍微疏忽一点点，老鼠仍然能找到那扇门。从科学的眼光来看，这是一个一级甲等的实验。正是这个实验使得老鼠走迷宫的实验有了意义，因为它揭示了老鼠实际运用的线索，而不是那些你认为它们会使用的线索。也正是这个实验，能够教会你在一个老鼠跑迷宫的实验中必须怎样设置实验控制条件，才能实现小心谨慎，控制好每一个细节。

我调查了这类实验后来发展的情况。杨先生之后的一个实验，再下一个实验，从来没有参考过杨先生的实验。他们从不借鉴杨先生把实验用的迷宫走廊铺上沙子的做法，做实验也不仔细。他们只是用老一套方法让老鼠走迷宫，根本不关注杨先生的重大发现，也没有人去参考他的论文，因为他没有任何新发现。事实上，他发现了老鼠研究实验中你必须要做的所有事情。但是，对这样有价值的实验视而不见，正是货拜族科学的一个特点。

还有一个例子，是莱因先生和其他人做的超感知觉实验。各色人等都批评过他们的实验—他们对自己的实验也做过自我批评—他们改进了技术，于是干扰因素越来越少，直到最后完全消失。所有研究超自然现

象的心理学家都在寻找可以重复的实验—你可以重复做实验，然后得到相同的结果—甚至是统计学意义上可重复的实验。他们让100万只老鼠跑迷宫—不，这次是人了！他们做了大量实验，而且也得到了统计结果。可是，等到下一次他们再做那个实验，却再也得不到原先那个结果了。这时候，有人说了：“大家期待实验可以重复，其实这个根本是无所谓的。”这算是科学吗？

这个人从“超心理学研究所”主任位置上退下来时还谈到了要建立新的机构。在谈到下一步该怎么做时，他说他们必须做的一件事就是：务必只挑选某一类学生来培养，即那些学生能够通过超心理学实验得到让人认可的结果—不要把时间浪费在空有抱负和兴趣，然而只能偶尔得到这些实验结果的学生身上。实施这样的教学策略，无疑是很危险的—只教学生如何去获得某种实验结果，而不是教他们如何坚持科研诚信去做实验。

所以我希望你们—时间不多了，我只送上一个祝愿—希望你们好运，去一个能坚持这种诚信品质的地方工作，在这个地方，你们不必为了保住你们的位子，也不必为了拿到研究经费而被迫放弃自己的科研诚信。但愿你们有这样的运气。请允许我最后给你们一点忠告：千万不要答应去做演讲，除非你很了解要讲的内容，或者你或多或少知道你要说些什么。

11 就像1，2，3那样简单

这是一个非常逗乐的故事，一个早慧的学生用他自己、自己的袜子、打字机和他的同学做实验，试图解开计数和计时的奥秘。

我小时候住在法洛克威，当时我有个朋友叫伯尼·沃克。我们俩在家里都有自己的“实验室”，常常做各种各样的“实验”。有一次，我俩在讨论什么问题—那时我们十一二岁吧—我说：“思考这回事，不过就是在内心和自己对话罢了。”

“哦，是吗？”伯尼说，“你知道汽车里那根奇形怪状的曲轴吧？”

“知道啊，那又怎么样呢？”

“好，那你告诉我，你是怎么对自己描述它的形状的？”

所以我从伯尼那儿学到了一点：除了语言这个思维工具外，还有形象思维一说。

上大学的时候，我开始对梦产生了兴趣。眼睛闭上了，可是一切都这么真切，就像是光线真的透过眼皮，落在视网膜上。难道说，视网膜上的视觉细胞真的能被另一种形式激活（也许是自己的大脑），或者大脑里有个“判断中心”，它在人做梦时失控了？尽管我对大脑如何运转非常感兴趣，可是我从未从心理学那儿得到任何满意的答案。心理学界忙着研究梦的解析。

我在普林斯顿读研究生的时候，一篇有点儿蠢的心理学论文引发了广泛的讨论。作者推断大脑中的“时间感”来自一个和铁有关的化学反应。我对自己说：“真是见鬼了，他是怎么得到这个结论的？”

原来，他妻子的体温长期不正常，时高时低，很频繁。不知怎的，他想起要测测她的时间感。他要他的妻子不看钟表，自己在脑子里计数，然后记下她数60下所花的时间。他让她一整天从早到晚地数（可怜

的女人！），最后发现她发烧的时候数得快，不发烧的时候数得慢。于是他推测，脑子里控制时间感觉的那部分一定是在发烧时运作速度更快。

作为一个很懂“科学”的人，那家伙知道化学反应的速度是随环境温度和化学反应的能量而变化的。他测量了他太太计数时的速度变化和相应的体温，判断温度是如何影响数秒速度的，然后从化学书里找到一个化学反应，它发生反应的速度随着温度变化的情况与他妻子的情况很接近。他发现铁的反应是最接近的。于是，他就推断他妻子的时间感觉是由她体内一个含铁的化学反应决定的。

在我看来，纯粹是在扯淡！在他那一串长长的推论中，任何一步都可能出很多错。不过，他提出的问题非常有趣：到底是什么决定了时间感觉？当你试图以某一种速度匀速计数，是什么决定这个速度的？你怎样做才能改变这个速度呢？

我决定研究一下这个问题。我先不看钟表，用一个平均的速度去默默数数：1，2，3，直到60。数完后一看钟，只花了48 秒。不过这并不是问题，只要能以一定的速度匀速计数，不是非要像钟表那样在一分钟内数完60个数不可。我又重复了一次，这回花了49秒，接下来是48秒、47秒、48秒、49秒、48秒、49秒……所以，看来我可以用相当稳定的速度来用脑子计数。

如果我坐在那儿不计数，只是估计一分钟的长短，结果就相差很大—时间长短参差不齐。因此，我发现，凭空估计一分钟时间是很不准确的，在计数的时候，我的时间感觉相当准确。

好了，现在我知道自己可以用一个稳定的速度计数，下一个问题是：哪些因素会影响计数的速度呢？

我猜想心率可能是一个因素。于是我便上上下下跑楼梯，弄得心跳极快。然后我冲回房间，把自己扔到床上，默数到60。

我还实验了在跑楼梯的同时默数了60下。

同学们看到我上蹿下跳，都乐了：“嘿，你干吗呢？”

我不能开口回答他们（这让我明白自己不能一边说话一边计数），我只是继续埋头起劲地跑，活像个疯子。

（研究生院的那帮家伙已经对我的疯疯癫癫习以为常了。有一次，一位老兄来我的宿舍，我正在做一个实验，忘了锁门。他看见我站在椅子上，穿着厚厚的羊皮大衣，探身到窗外，外头是一片冰天雪地；我一手拿着一只碗，另一手不停地在碗里搅拌。我见他进来，大声嚷嚷："不要来烦我！不要来烦我！"那次我在做一个果冻的实验：我想知道如果不断搅拌果冻，在低温下是否还会凝结成胶冻。）

话说回来，我试着先在楼梯上跑上跑下的时候默数，之后再躺在床上计数，或是把顺序变一下—先在床上默数，再去跑楼梯，还边数数。我尝试了各种组合形式，就是想看看身体运动和休息时不同的心率对计数是否会有影响。想不到结果是这样：心率对计数没有影响。此外，我觉得体温对计数也没有什么影响，因为运动使我浑身冒热气（虽然我知道锻炼并不会让身体温度升高）。事实上，我没找到任何影响我计数速度的因素。

跑楼梯没多久就变得枯燥无味了，我就在做其他事的同时计数—反正那些事我都得去做。比如，把洗好的衣服（从洗衣桶里）往外拿的时候，我会填一张表格，写上我洗了几件衬衣、几条裤子，等等，同时我还要在脑子里计数。我发现自己在计数的同时，可以在裤子一栏写个"4"，在"衬衫"一栏写上"3"，可写到袜子就糟了，我就继续不下去了—要洗的袜子实在太多了。我已经动用自己脑子里的"计算机"数到36，37，38了，可是眼前还有一大堆，39，40，41……这可怎么办？

后来，我发现可以把它们放在不同的几何图形中，比如放在一个四方形中：左上角一双，右上角一双，这边一双，那边一双—行了，一共8只袜子。

我继续玩这个用图形计数的游戏。同样，我发现我在计数的时候，还可以同时"数"出报纸上文章有几行字。方法是这样的：把3行字分成一组，就这样3行一组、3行一组地从第一组一直数到第十组；接着再数3行，再数3行，再来3行，最后再加上1行，这样就有100行了。就这样，我拿报纸上的行数做了另一个参照物来计数。当我默数到60下时，

我知道自己已经看到报纸的哪一行了，我说：“数到60下了，对应报纸已经走到第113行了。”更奇妙的是，在数这60下时，我发现自己竟然还有余力看报纸，而计数的速度并没有受到任何影响！事实上，我可以一边计数一边做任何事—当然，除了大声说话外。

那么，打字呢？那可是把一本书上的文字用打字机打出来！我发现自己还是可以做到的，我可以边计数边打字。可是这回，我发现计数的速度受到影响了。我大为振奋，我终于找到了一个可以影响我计数速度的事情了！于是，我埋头研究下去了。

我一边打字一边默默计数，一边数着：“19，20，21……”正好碰到简单的单词，我打得飞快，还一路数下去……“27，28，29”……直到碰上一个词，“见鬼，这词什么意思？”然后明白过来，“噢，是它呀！”接着数，“30，31，32” ……等数到60的时候，我比以往多花了一些时间。

经过一些反思和进一步的观察，我终于找出答案了：当我遇到有难度的单词时，处理它需要更多的“脑力”，于是我就会中断计数，也就是说，我的注意力被分散了。其实我用脑子计数的速度并没有变慢，而是计数这件事情不时地被迫中断。从1数到60，这已经是一个很机械的过程了，以至于我自己一开始并没有注意到计数过程被打断。

第二天早上吃早餐的时候，我向同桌的伙伴们说了这一系列的实验。我告诉他们，我可以一边计数一边做任何事情—只有说话除外。

一个叫约翰·吐其的家伙说：“我不相信你可以一边阅读一边计数，我也不相信你怎么就不能一边计数一边说话。我敢打赌，你不能边计数边阅读，而我能一边计数一边说话！”

于是，我给他们演示了一遍。他们拿来一本书，我一边看一边默默计数。数到60下，我叫停了—果然用时48秒，我的表现很稳定，然后我告诉他们刚才我从书里读到了什么。

吐其惊讶不已。我们拿他做了几次实验，测到了他用脑子数到60的平均用时。接着，他开始说话：“玛丽有只小羊羔，我想讲啥就讲啥，一

点儿问题也没有，不知为什么，你们就不行……”他哇啦哇啦说个不停。最后，他叫道：“到点了！”我们一看，他计数的用时和刚才我们测他的时间分毫不差！我简直不能相信！

我们讨论了一会儿，然后就有了发现。原来吐其计数的方式和我不同，他在计数的时候，想象有一条长长的写着数字的纸条在他面前移动，这样他可以在嘴上念：“玛丽有只小羊羔。”这下可弄清楚了：因为他计数的时候“看着”想象中的那张移动的纸条，所以他可以说话但不能阅读；我正好相反，我在计数的时候是在心底里计数—用和自己对话的形式，所以我不能同时开口说话。

有了这个发现之后，我又尝试在计数时大声朗读书本—有时候我们两人都做不到。我就这么琢磨：（因为高声朗读需要占用脑子的一部分注意力，）如果我能动用脑子里一个区域，它既不会影响脑子里主管视觉的区域，也不会影响主管语言的区域，说不定就能同时完成朗读和计数这两件事情。所以我想到了用手指，因为这只和触觉有关。

很快我就成功了，我能用手指来计数，同时还能大声地朗读。不过我想让整个过程都用意识操控，不依赖任何肢体动作，所以我试着一边朗读，一边想象着用手指数数。

我一直无法成功。也许是我练习不够，没有熟练到那种地步；也许这根本就不可能做到，因为我从来没有见过哪个人能成功做到这一点。

通过那个实验，吐其和我发现，人们认为他们在做同一件事情—比如说，在脑子里计数这么简单的事情—可是做事的同时，他们脑子运转的情况很不一样。而且我们发现：可以用非介入（脑子内部）的、客观的方法检测脑子是如何工作的。举个例子，我们问一个人是如何计数的，就没有必要依赖他对自己的观察和分析，你可以观察在他计数时能做什么和不能做什么。这样的测试是绝对客观的，它无懈可击，人们没法作假。

人们用已知的知识来解释新的想法，这是一件很自然的事情。概念是一层层堆积起来的：这个想法是由那个概念解释的，而那个概念又是由另外一个概念来解释的；而这最基础的概念可能就来自计数这样的事

情，而这个概念完全是因人而异。

我常常会想起这个，尤其是我在教很艰深难懂的内容时—比如贝塞尔函数的积分公式，当我看到这个公式的时候，我看到的字母是五颜六色的—我也不知为什么。就在我现在说话的时候，我会隐隐约约（在脑海中）看到杰克和艾曼德的教科书里的贝塞尔函数公式，里头的j是浅棕色的，n是浅浅的蓝紫色，深褐色的x到处飞舞。我不知道，对于我的学生来说，那个公式究竟会是什么模样。

12 理查德·费曼构建一个宇宙

费曼曾经接受过一次由美国科学促进会资助的采访。在这个之前没有被公开的访谈中，费曼回顾了他的科学生涯：他平生第一次面对满屋子的诺贝尔奖得主，战战兢兢地发表演讲；受邀参与世界上第一颗原子弹的研制以及他当时的反应；“货拜族”科学；那通黎明前吵醒他的重要电话—一名记者告诉他：“你刚刚赢得了诺贝尔奖！”费曼的反应是：“你应该等到天亮了再告诉我。”

旁白：麦尔·费曼是纽约一家制服公司的推销员，1918年5月11日，他迎来了儿子理查德的诞生。47年后，理查德·费曼获得了诺贝尔物理学奖。正如理查德·费曼所说，这个成功与麦尔·费曼有莫大的关系。

费曼：在我出生之前，他（我父亲）对我母亲说：“这个男孩将来会成为一名科学家。”现在你在女权主义者面前当然不能说这样的话，但那个时候，人们确实就是这样说话的。不过，他从来没有跟我说“你要当一个科学家”这类的话……我学会了去欣赏原本习以为常的东西。我从来没有什么压力……我稍大之后，他带我去树林里散步，指点我看动物和鸟，等等；他还告诉我星星、原子以及其他事情。他会告诉我那些事物有趣的地方。他自有一套看待这个世界的方法，而他观察世界的方法—我觉得，对于一个没有受过正规科学训练的人来说，是非常科学的。

旁白：理查德·费曼是位于帕萨迪纳的加州理工大学的物理教授，他从1950年起就在那里工作了。他的时间，一部分用于教学，另一部分投入到对构成我们这个宇宙的微小的物质的理论研究中。在他的整个研究生涯中，他富有诗意的想象有时会把他带到许多神奇的领域：制造原子弹所需的数学，结构简单的病毒的遗传学，极端低温状态下氦的性质。使他获得诺贝尔奖的研究—量子电动力学理论，帮助物理学家更直接、更有效地解决了许多物理问题。然而，这一长串成就最初源于费曼和他的父亲在树林里的散步。

费曼：他有观察事物的一套方法。他经常说："假设我们是火星人，我们来到地球，然后我们会看到这些奇怪的生物在做一些事情，我们会想些什么？"他会说："比如，举个例子来说，假设我们从不睡觉，因为我们是火星人，但是我们的意识一直很清醒。我们发现，地球上这些生物每天有8个小时会放下工作，还要闭上眼睛，这期间他们或多或少变得迟钝了。我们有个有趣的问题要问他们，我们会问：'这整个过程中你们感觉如何？你们的思想发生了什么变化？你们状况良好，能清晰地思考问题—那么这过程中发生什么事了吗？你们的思想是突然停下来的呢，还是变得越来越慢、最后停了下来呢？或者准确地说，你们是怎么停止思考的？'"后来我对这个问题思考了许多，在大学里还做了实验，我想找出这个问题的答案—在睡觉时，你的思维究竟发生了什么变化？

旁白：一开始，费曼博士是想做一个电机工程师的，他学物理，打算用它为自己和身边的这个世界服务。但是没过多久，他就意识到，其实自己更感兴趣的是现象背后的原理：那些使世间万物运转的原理，以及隐藏在宇宙运行现象背后的物理理论和数学原则。于是，他的头脑就变成了他的实验室。

费曼：小时候，我的所谓的实验室只是一个供我瞎鼓捣的地方，我做收音机、小配件、光敏电池诸如此类的小玩意儿。后来，我在大学里看到一个他们口中的实验室，我很震惊。在那里，人们要郑重其事地测量一些东西。而我在自己的实验室里，从来没有测量过什么东西，就是到处鼓捣。这就是我小时候拥有的实验室，那时候我想，这就是我以后要走的路了。在那个实验室里，我要解决这样一些具体的问题。比如说，我那时经常要修收音机，我要把电阻和一些伏特表连在一起，用这种方法来改变电流，诸如此类的事情。于是我开始去找这些公式——电学公式。我的一个朋友有一本书，上面有电学公式，显示变阻器关系的公式。书上有这些公式，比如电的功率是电流的平方乘以电压、电压除以电流就是电阻，等等，共有六七个公式。在我看来，这些公式相互有联系，它们确实不是完全独立的，这个公式可以从那个公式推导出来。于是我就换各种花样反复验证，利用从学校学到的代数知识，我明白了怎样去推导这些公式。在这过程中，我认识到了数学的重要性。

所以，我对物理相关的数学知识越来越感兴趣。不过，数学本身对

我也有很大的吸引力。我这一辈子都热爱数学 [……]

旁白：从麻省理工学院毕业之后，理查德·费曼去了普林斯顿大学——在麻省理工学院西南方大约400英里（约644千米）的地方，他在那里拿到了他的博士学位。也正是在那里，他做了平生第一次正式的学术报告，时年24岁。事实证明，对费曼来说，那是一次十分重要的人生经历。

费曼：在普林斯顿的时候，我给惠勒43教授当助手，我们一起研究出一个新理论，是关于光如何起作用，以及不同位置的原子如何相互作用。在那个时候，这是一个相当有意思的理论。因此，主持研讨会的维格纳44教授建议我们做一个这方面的报告。惠勒教授说我是个年轻人，之前也没有做过学术报告，这将是一个学习的好机会。所以就这样，我迎来了平生第一个学术报告。

我开始为之做准备。维格纳教授过来跟我说，他认为我们这个研究相当重要，所以他特地邀请了一些重量级的人物来参加这次报告会，这其中有泡利教授，他是从苏黎世来的访问学者、著名物理学教授；冯·诺依曼教授，世界上最著名的数学家；亨利·诺里斯·罗素，著名天文学家；还有阿尔伯特·爱因斯坦，他当时住在附近。我当时一定是吓得脸色煞白，因为他对我这样说："不要紧张，别担心。首先，如果罗素教授打瞌睡了，你不要感到沮丧，因为他总是在研讨会上打瞌睡。如果你讲的过程中，泡利教授频频点头，你也不要得意，因为他总是在点头，他中风了。"他说了很多这样的话。这让我稍微镇定了一些，但我还是很担心。最后，惠勒教授向我保证，由他回答所有的听众提问，我只需要做好学术报告。

我清楚记得当时走进会场的感觉——你可以想象那种"人生第一次"——就像在钻火圈。我早已提前把所有的方程式都写在黑板上了，那满满一黑板的方程式！其实，人们不需要这么多的方程式……他们只想更好地理解你的想法。我记得自己走上讲台，而那些伟大的人物就坐在听众席里，真是要命！我好像还能看见当时自己的那双手，当我从文件袋里往外抽出讲稿，手那个颤抖啊！但是我一拿出讲稿，开口做报告时，情况就完全不同了——从那时起，只要是在大庭广众下做学术报告，我都很镇

定自若。这种感觉真是很美妙。我只要一谈物理—我热爱它—我想也只有谈起物理时，我就不再担心我是在什么场合了，我就什么也不担心了。一切进行得很顺利。我只是尽我所能，认真介绍我们做的研究工作。我不考虑有谁在场，我只考虑我要解释的问题。然后，到了提问环节，我也没什么可担心的，因为有惠勒教授出面应对。泡利教授站了起来—他坐在爱因斯坦旁边。他说："我认为这个理论不对，因为这个和这个原因，那个和那个原因，还有其他原因，等等。难道你不同意我的看法吗，爱因斯坦教授？"爱因斯坦回答说："不—"这是我所听过的最美妙的"不"。

旁白：在普林斯顿，理查德·费曼明白了一件事：即使他完全生活在自己的世界里—那里全是数学和理论物理，在这之外，仍然有个世界，那个世界坚持要求他做很实际的工作。那时正值第二次世界大战，美国刚刚开始原子弹的研制工作。

费曼：就在那个时候，鲍勃·威尔逊来到我的房间，告诉我他要开始的一个项目，研究如何提炼原子弹所需的铀。他说下午3:00有个秘密会议，但是他知道，一旦我知道这个秘密的研究，就一定会参加，所以告诉我也不会有什么危险。我说："你错了。你不该告诉我这个秘密，我不会参加的。我要回去做我自己的事情—我还有毕业论文要写。"他走出房间，甩下一句话："我们下午3:00开会。"这会儿是早上，我来回在房间里踱步，思考一个问题：如果这炸弹捏在德国人手里会带来怎样严重的后果？我思来想去，最后认定这个研究很重要，也很带劲儿。所以我就参加了3:00的会议，同时暂停了学位论文的写作。

问题是，为了制造原子弹，你必须分离铀同位素。铀有两种同位素，其中铀235比较活跃，你得把它们分离开来。威尔逊已经发明了一种分离方案：首先把一些铀原子变成带电的离子，让它们成为离子束—在同样的能量下，这两种同位素的速度有轻微的不同。因此，如果你让它们通过一条长长的试管，其中一种同位素就会跑在另一种同位素前头，这样你就可以把它们分离开来了。这是他的计划。我那时做的是理论研究。我最初分配到的任务就是论证威尔逊设计的方案是否完全可行，究竟能不能做到。还有关于空间电荷制约的许多问题等等。经过推算，我得出结论：那是可以做到的。

旁白：尽管费曼推断威尔逊分离铀同位素的方法在理论上确实是可行的，但是最终军方还是采用了另一种生产铀235的方法。即便如此，在新墨西哥州洛斯阿拉莫斯的主要实验室里，仍然有许多工作等待费曼和他的高水准的理论推算能力去完成。战后，他加入了康奈尔大学的核研究实验室。如今他对他参与的原子弹研制工作怀有一种复杂的感情：他到底是做了正确的事情，还是做错了？

费曼：不，我不认为我那时的决定是个错误。我考虑了原子弹的问题，我确实认为：如果纳粹先造出原子弹，那将会非常危险。不过，我认为，我还是犯了一个错误，那就是在德国被打败后—在德国战败三四年之后，那时离我们取得胜利已经很长时间了—我们仍然在十分努力地工作。我没有停下来，我甚至没有考虑过做这项研究的最初动机已经不复存在了。那是我得到的一个教训，那就是：如果你有理由去做一件事，而且理由很充分，那么你就开始去做，但是你一定要时不时关注一下现在的情形，看看最初的动机是否还是正当的。在我做出那个决定的时候，我认为它是正确的，但是继续做下去而没有思考，那可能就错了。我不知道，如果我那时真的去考虑这个问题，可能又会发生什么事呢？也许我还是会打定主意，无论如何都要继续做下去，我不知道。但是，促使我做出最初决定的外部环境已经改变了，而我没有去考虑这一点，这确实是一个错误。

旁白：在康奈尔度过了激动人心的五年之后，像他之前和之后的许多美国东部人一样，费曼博士被加利福尼亚和加州理工学院吸引住了，那里的学术氛围同样很振奋人心。当然，还有其他原因。

费曼：首先，伊萨卡的气候不好。其次，我还蛮喜欢去夜总会之类的地方。

鲍勃·巴赫邀请我到这里来，还请我开了一系列讲座，内容就是我在康奈尔研究的那些工作。于是我就做了一些演讲，然后他对我说：“要不，我的汽车借给你开吧？”我很高兴，开着他的车，每天晚上我都去好莱坞和日落大道，在那里玩得很开心。舒适的气候和辽阔的地域，都是纽约州北部的小镇不可企及的。这两个因素最终把我带到了这里。做出这种选择，其实不难，而且我的选择也没有错。这是我又一个没有做错

的决定。

旁白：在加州理工学院，费曼博士担任理论物理的理查德·查斯·托尔曼教授[45]一职。1954年，他获得了阿尔伯特·爱因斯坦奖。1962年，原子能协会授予他E.O.劳伦斯奖，奖励“他在原子能的发展、使用和控制上的卓著贡献”。最后，在1965年，他获得了科学界最重量级的奖项—诺贝尔奖。他和日本的朝永振一郎、哈佛的朱利安·施温格一起获得这个奖。对费曼博士来说，这个诺贝尔奖让他半夜里受了惊扰。

费曼：电话响了，那家伙说（他是）某家广播公司的。我被吵醒，很恼火，这是很自然的反应。要知道，你半夜被人吵醒了，当然很恼火。那家伙说；“我们很高兴地告诉您，您赢得了诺贝尔奖。”我自己心里还在腹诽—你懂的，我还在生气—当时听了也没有上心。于是我说：“你应该等到天亮了再告诉我。”于是他说：“我还以为您想知道这事。”然后，我说我在睡觉，就把电话挂了。我太太说：“什么事？”我说：“我得了诺贝尔奖。”她说：“你再编下去，别逗我了。”我常常想要愚弄她，但是从来没有得逞。每次我想戏弄她，她总能看穿，但这次她错了。她以为我在开玩笑。她以为是某个学生，某个喝多了的学生，或者另外什么人。所以她不相信我。但是10分钟之后，另一家报纸的报喜电话来了，我对那个家伙说：“好的，我已经听说了。现在，请让我清净一下吧。”说完，我就把电话摘了，我想我该回去睡觉，到8点钟再把电话接上。可是我再也睡不着了，我太太也睡不着。我起来了，在房间里走来走去，最后我又把听筒放回去，开始接电话。

这之后不久，我在一个地方坐出租车，出租车司机和我聊起我获奖这件事，我就把自己遇到的麻烦说给他听：那帮家伙一直追问我，我又不知道该怎么应对，等等。他说：“我看过你的一个访谈。我是在电视上看的。那家伙问你：‘请您用两分钟解释一下，您做了什么拿到这个奖的？’你真的说给他们听了，这真是疯了。你知道我会怎么说？‘嗨，老兄，如果我能在两分钟内解释给你听，我就没资格获这个诺贝尔奖了。’”从那以后，我就用这个来回答别人。如果有人问我，我就说：“你瞧！要是我那么容易就把这问题解释清楚喽，那它就不配拿诺贝尔奖了。”这么说其实不怎么合适，可出租车司机教我的这个回答很妙。

旁白：前面已经提到，费曼博士获得诺贝尔奖，是因为他对一个新的研究领域—量子电动力学的理论发展所做出的贡献。正如费曼对它的评价，这是“一个能解释所有其他事物的理论”。它不适用于核能或重力，但是它确实适用于电子和光子间的相互作用。它能解释电的流动方式、磁现象、X射线的产生方法及其与其他物质形式的相互作用。量子电动力学中的“量子”印证了20世纪中期的一个理论，这个理论称，环绕在每个原子核周围的电子受一定的量子状态或能级的限制。它们只能存在于某些能级上，而不可能处于两个能级之间。另外，这些量子化的能级取决于照射在原子上的光的强度和其他一些因素。

费曼：理论物理最大、最重要的一个工具是废纸篋。你得知道什么时候该放手，对吗？实际上，所有我所知道的关于电学、磁学、量子力学和其他一些东西都是在我试着构建这个理论的过程中学到的。让我获得诺贝尔奖的东西，归根到底要说到1947年，那时我想改变和修正一个普通的理论，而在这过程中遇到了一些问题，我正在设法解决它。贝特劝诫我：“如果你做的确实是正确的事情，如果你能撇掉一些事，却抓住另外一些事；如果你的做法正确，那么，你就能得到可以和实验结果相媲美的结果。”他还给了我一些建议。那时我对电动力学有相当充足的了解，在此之前，我已经尝试过用大约655种不同的形式来表述这个疯狂的理论。可以说，我知道怎么做使他得到想要的东西，知道如何用非常便利的方法来很顺利地控制并开展这项计算工作，我有很有效的手段去完成这件事情。换句话说，我有一套自己琢磨出来的方法，借助这套方法，我在旧理论的基础上逐渐构建起我自己的理论—听起来像是很自然而然的事情，而我自己好些年没有想到用这个方法—那时我就发现这个理论非常管用，我用这个（改头换面的）旧理论来处理问题，比起之前任何人都要快得多。

旁白：除了其他诸多用途，费曼博士的量子电动力学理论为我们提供了一个新的视角,它帮助我们理解把物质聚集在一起的那种力。它还让我们对转瞬即逝的、无穷小的粒子的性质有了更多一点的了解—宇宙中所有其他物质都是由这些转瞬即逝的、无穷小的粒子构成的。随着物理学家对物质本质结构的研究越来越深入，他们发现，那些看起来很简单的，实际上可能非常复杂；而那些看起来很复杂的，实际上可能非常简

单。他们的工具是高能原子粉碎机，它能够把原子级的粒子轰击成越来越小的碎片。

费曼：我们观察世界，一开始的时候，我们看到很多不同的现象—风、波浪、月亮，还有其他很多东西。我们想重新解读它们。风的运动是不是很像波浪的运动？等等。渐渐地，我们发现许许多多的事物都是相似的，世界上各种现象的种类并不像我们想象的那么多。我们不仅看到了所有的现象，我们还知道了它们背后隐藏的原理，其中最有用的一个原理看来是这个：世间万物都是由一些物质构成的。比如，我们发现所有物质都由原子构成，只要了解原子的性质，我们就可以理解很多东西了。最初，人们认为原子应该很简单，但是，后来人们发现，为了解释所有的事物及现象，原子的结构应该更复杂一些，现在人们知道有92种原子。实际上，原子的种类要比这多得多，因为它们的质量各不相同。接下来的问题，是要了解各类原子不同的性质。我们发现，如果了解到原子本身也是由一些更小的东西构成的，我们就能理解原子性质的千差万别了—原子是由原子核以及围绕着原子核运动的电子构成的—各类原子的不同之处仅仅在于它们的电子数不同。在万事万物背后真正起作用的正是这个漂亮的、大一统的规则。

所有不同的原子，其实是同一样东西，只是它们携带电子数量不同。可是，原子核也不尽相同。于是我们开始着手研究原子核。我们采用卢瑟福实验等轰击原子核，立即就发现了大量不同种类的原子核。从1914年起，他们先是发现原子核很复杂，然后又意识到，假如原子核也是由一些更小的粒子构成的话，那么它们也是可以被理解的。原子核是由中子和质子构成的，这两者之间的相互作用力把它们维系在一起。为了理解原子核，我们必须对这种相互作用力有更深入一点的理解。顺便提一下，就原子本身而言，也有一种相互作用力，那是一种电作用力，我们是知道这个的。因此，除电子之外，还有一种电作用力，我们称为光子。光和电作用力被整合成为一个叫光子的东西，所以外部世界，也就是说原子核外的空间里是电子和光子。描述电子行为的理论，是量子电动力学，我就是因为研究这套理论获得了诺贝尔奖。

但是现在我们走进原子核，发现它们可能由中子和质子构成，但是，这里也有那种奇怪的作用力。接下来一个问题，是努力理解这种作

用力。汤川秀树提出了各种看法，认为可能有其他类型的粒子。于是我们做了实验，设法让高能量的中子和质子互相撞击，结果确实撞击出新东西来了—就像我们让能量足够高的电子互相撞击，就会出来光子一样。这次，我们打出来的新的粒子是介子。看来，汤川秀树是对的。我们继续做实验。接下来，我们得到了无数种不同的粒子，你要知道，不只是一种光子，我们让光子和中子撞击在一起，得到了400余种不同种类的粒子—λ粒子和Σ粒子。它们各不相同。此外，还有π介子和K介子，等等。我们还碰巧制造出了μ子，但它们显然与中子和质子没有什么关系—至少比不上电子与它们的关系密切。那是一个意外的发现，我们也不知道后来它跑到哪里去了。它就像是一个电子，但是比电子又重一些。所以，我们这儿有了电子和μ子，它们与其他那些粒子之间没有强烈的相互作用—其他那些粒子我们称为强相互作用粒子，或强子。强子包括质子、中子，以及你让它们猛烈对撞后立即就能产生的所有粒子。现在的任务就是系统地试验和描述所有这些粒子的性质。这是个大工程，所有人都投入到了这项工作中去。它被称为高能物理学或基本粒子物理学。过去人们习惯叫它基本粒子物理学，但是没有人会相信400种不同的粒子都是“基本”的—它们有可能是由更基本的粒子构成的。这种可能性看起来很合理。于是，人们发明了一个名字—“夸克理论”。这个理论说，这些粒子里的某些种类，比如质子和中子等等，都是由三种叫“夸克”的东西构成的。

旁白：至今还没有人见过夸克长什么样子，这真是很遗憾，因为夸克是构成原子和分子的基本材料，而这些结构更为复杂的原子和分子则构成了宇宙万物。“夸克”这个名字是费曼的同事默里·盖尔曼在几年前随意起的。让盖尔曼博士有些吃惊的是，早于他30年前，爱尔兰小说家詹姆士·乔伊斯就已经在其著作《芬尼根守灵夜》中预见性地用到了这个名字，其关键词是“冲马克老爷三呼夸克”。费曼博士解释，更为巧合的是，构成宇宙间各种粒子的夸克目前看来确实有三种。在寻找夸克的过程中，物理学家设法将能量很高的质子和中子撞击，希望它们在撞击过程中分裂出夸克。

费曼：这些都对，但有一点让夸克理论陷入困境，夸克理论明显过于绝对化了。如果这些粒子是由夸克构成的，那么我们轰击两个质子的

话，应该产生3个夸克。而事实上，在我们现在谈论的这个夸克模型中，夸克带的电荷十分奇特。我们所知道的自然界所有粒子带的电荷都是整数，通常是一个正电荷，或一个负电荷，或者不带电。但是根据夸克理论，夸克带的电荷，或是负1/3电荷，或是正2/3个电荷。如果这种粒子真的存在，它应该很明显，早就被我们观测到了，因为它经过云室时留下的气泡数目会少得多。比如一个带1/3电荷的粒子，它沿途击打的原子就应该都带有1/9的电荷—这是按照平方反比率计算的。所以和一个普通粒子相比，它沿途留下的气泡只有前者的1/9，这应该是很明显的。如果你能看到一条轻轻划过的痕迹，这就说明有问题了。他们一直在苦苦寻找这样的一条痕迹，但是至今还没有找到。这仅仅是这套理论当中一个很严重的漏洞。这也让我们感到很兴奋，它促使我们思考：我们走的路子正确吗？或者我们完全是在黑暗中瞎转悠，离找到真相还有很大的距离？或者我们已经快要接近真相了，只是还不知道怎样去把握住它？一旦我们能正确把握住它，我们就会顿时明白为什么那个实验看起来不太一样。

旁白：如果这些利用原子粉碎机和云室做的高能物理实验确实能证明世间万物都是由夸克构成的，那又有什么用途呢？我们有没有可能亲眼看到它们？

费曼：努力去弄懂强子和μ子等等，这件事在我看来，目前根本看不到什么实用价值，事实上一点儿用也没有。过去有不少这样的例子，很多人说，他们根本看不出这个研究有什么实用价值，可是后来发现这些研究都有用。还有一些人会信誓旦旦地保证，这个研究一定会大有用处。说实话，我觉得那些人很傻。我的意思是，断言某个研究永远不会有什么用处，这是件很傻的事。现在，我也准备当一回傻子，我说研究这些玩意儿压根儿不会有任何应用价值。不是吗？那么你为什么要研究这个呢？因为追求实用价值不是世人做事唯一的目的。探索世界万物是由什么构成的，这是件很有趣的事。正是出于这样的兴趣，人类的好奇心促使我们造出了望远镜。知道宇宙的年龄有什么实用价值？还有，那些遥远的类星体的爆炸跟我们有什么关系？我的意思是，整个天文学又有什么用？什么实际用处都没有，但是很有意思。所以，我探索我们这个世界也是出于这个目的，我满足的是自己的好奇心。如果说满足人类

的好奇心也是一种需要，从这层意思来看，努力去满足它，这也是有实用价值的。目前我就是这么看待我们所做的研究的。我不会做出任何许诺，说它将来会有什么经济意义。

旁白：对于科学本身及其对我们的意义，费曼说他不愿意对此展开哲学探讨。然而这并不妨碍他就科学是什么和科学不该是什么样提出自己的观点，这些观点很有趣，极富启发性。

费曼：我得说，科学从它诞生之日起，就是这个样子。它致力于理解某些问题或事物，它依据的原则是：凡是发生了的就是真的，这也是判断一个理论正确与否的标准。如果李森科说，你把500代老鼠的尾巴都砍掉，之后新生的老鼠就没有尾巴了（我不知道他是不是说过这样的话，我们姑且就认为是某某先生说的）。然后你去做实验，结果不是这样的，于是我们知道那个理论不正确。这个原则就是：通过实验或经验将正确的和错误的认知区分开来。由此获得的符合这个原则的知识体系连同这个原则，就构成了科学。

除了实验，我们带给科学的，还有无数追寻普遍真理的充满智慧的尝试。所以，科学不仅仅是那些在实验中碰巧发生的，被证实为正确的理论的总和；科学也不仅仅是我们剪掉老鼠尾巴时会发生的那些事实的综合—那样的话，我们脑袋里就要装太多太多的东西了。我们已经发现了大量的普遍性原则。比如，如果这理论适用于老鼠和猫，我们就说它同样适用于其他哺乳动物；如果它也适用于植物，那么，在一定程度上，它就是生物的一个自然属性，是我们先天就有的，而不是后天形成。但是，这种推理不是几乎完全正确的，而是绝对正确的。我们后来发现，有实验证明细胞能够通过线粒体或其他东西传递遗传信息，于是我们就一边研究一边修正这理论。但所有的理论必须尽可能具有广泛性和普遍性，而且还要与实验结果保持完全一致，这才是真正的挑战。

你知道，通过实验得到一些结论—这听起来十分简单—你只需去做实验，然后看结果。但是，由于人是有弱点的生物，事实表明，做到这一点远比你想象的要困难得多。拿教育做例子，一个人看到人们教数学的方法，他说："我有个更好的办法。我要做一个玩具计算机，用这个来教学生。"于是他找了些孩子来做实验—他找不到很多孩子来做实验，也

许有人给了他一个班级来试试。他热爱这项工作，他很兴奋。他完全清楚自己要做什么。孩子们知道这是样新鲜事物，所以他们也都很兴奋。他们学得非常好，他们的算术学得比其他孩子都好。你考了一下他们—他们学的是算术，然后这就作为一个案例被记录下来：这种教学方法可以提高算术成绩。但是，这是一个个案，它没有普遍性，因为这个实验的一个前提条件是教学的人就是这种教学方法的发明人。而你真正想知道的是，如果把这个方法写进一本教师用书，供普通教师使用（你必须考虑普通的教师，实际上各地教师中，肯定有许多水平一般的教师），他们拿到这本书，然后尝试用书上介绍的方法教算术，教学效果一定会变好？换句话说，事实上，你所知道的各种各样关于教育、社会学，甚至心理学的陈述—所有这类事，我得说，它们都是伪科学。他们做了统计，据他们自己说，统计得非常仔细；他们做了实验，其实那些并不是真正的可控实验。那些实验结果，其实没有严格意义上可控实验应该具备的可复制性。他们把所有这些做成实验报告，因为做得很细致认真的科学研究都会成功，他们认为这么做，就会得到回报。我这里有一个例子。

在所罗门群岛，如许多人所知道的，岛上的原住民原本不知道飞机为何物。在“二战”期间，飞机曾降落在岛上，并给士兵们带来各种各样的好东西，所以这些岛上出现了飞机崇拜。他们仿建了飞机降落跑道，在跑道边上点上篝火模仿灯光，一个可怜的原住民坐在他修建的一个木盒子里，戴着木制的耳机，上面插着细竹竿代表天线，前后晃动着脑袋。他们还有木制的雷达罩和其他一些东西，希望借此吸引飞机给他们带来好东西。他们不过在拙劣地复制战时机场的样子，这也正是某些人干的事。而我们现在很多领域有出奇多的活动，打着科学的幌子，实质上和那些岛民的行为没有两样。举个例子，所谓的教育科学，其实根本就算不上科学。他们做了大量工作，就好像是花了大量时间雕琢出那些东西，那些木头飞机，但是这并不意味着他们真的发现了什么有价值的东西。刑罚学，监狱改革—目的是要弄清人们为什么犯罪。看着这世界—以我们现代人对这些事情的理解，我们对此看得越来越明白。对教育的理解更多了，对犯罪的理解更多了，但是考试成绩不断下滑，监狱里的犯人在不断增多。年轻人在犯罪，而我们根本不了解原因。想要以模仿科学的方式—他们现在正在用的方式，去发现事物的某些特性，这种

做法就是没有效果。现在如果我们懂得如何运用科学方法，那么科学方法在这些领域是否能起作用？我不知道。在这方面，它尤其无力。也许有一些别的什么方法，比如倾听过去人们的想法和老人多年的经验，这或许是个好主意。只有当你另有一个独立的信息来源，而且你已经决定挖掘那方面的资料时，你才能不理会那些过往。对于那些已经见过和思考过这事物，并且不科学地得出了一个结论的人，如果你想忽略他们的智慧，那么你一定要留心你是在追随谁。比起身处现代社会的你，他们观点正确的概率并不比你少，而你们做出不科学的结论的概率也是一样的。

我说的这些怎么样？要做一个哲学家，我还算够格吗？

旁白：在今天的《科学的未来》这个节目里，您刚刚听到的是加州理工学院的理查德·费曼博士的访谈录音。我们采访了多位诺贝尔奖得主，制作成系列录音访谈节目。该系列访谈节目是由美国科学促进协会资助的。

13 科学和宗教的关系

在一个思想实验中，费曼设想了一场研讨会，其间科学家和唯心论者纷纷表述各自不同的思索和观点，讨论科学和宗教之间的相同和不同之处。科学和宗教都在探寻真理，它们有着根本的区别，目前争论很激烈。费曼展望了未来20年间这两者可能的争辩。在其他问题上，费曼提出了自己的疑惑：无神论者能否建立起基于其科学知识的伦理道德，就像唯心论者基于他们对神的信仰而建立起一套伦理道德？对于注重实效的费曼来说，这是个非同寻常的哲学命题。

在这个专业化日趋精细的年代，精通某个领域的人往往没有能力去讨论另一个领域的问题。正是因为这个原因，我们对于人类活动不同领域的关系的公开讨论越来越少了。回顾过去关于这类主题的大辩论，我们有点羡慕，因为我们原本也喜欢这种辩论中思想激荡的乐趣。一些古老的问题，比如科学与宗教的关系等问题，仍然存在。我相信在这类问题上，我们面临着和过去一样的困境，但是因为专业的制约，现在人们很少公开讨论它们了。

但是长久以来，我对这个问题一直怀有浓厚的兴趣，所以很想来讨论一下。考虑到我的宗教知识以及对宗教的理解极其有限（随着讨论的深入，我这方面的欠缺会越来越明显），我想这样来安排讨论：我要做一个假设，不是一个人，而是一群人在讨论这个问题，他们是来自不同领域的专家—不同的科学学科，不同的宗教派别，等等，我们将从不同的方面来讨论这个问题，像个研讨会。每个人都给出自己的看法。

随着讨论的进行，他的看法可能被淹没，也有可能被修正。而且我还要想象有一个人通过抽签获得首先发言权，而我就是那个第一个发言的人。

我首先提一个问题：一个在信教的家庭长大的年轻人学习科学，结果对他父亲信奉的神产生了怀疑—也许后来就不信神了。实际上，这不

是一个特例，这样的事时有发生。虽然我没有这方面的统计数字，但我相信，许多科学家—实际上，我确信半数以上的科学家，确实不信他们父亲的神，也就是说，他们不再以传统的方式去信奉神。

既然信奉神是宗教的核心特征，那么，我选择的问题可能是科学和宗教的关系中最为尖锐的一个问题：这个年轻人为什么开始不信神了呢？

我们可能听到的第一个答案非常简单：你知道，是科学家教他的，（正如我已经指出的）他们内心都是无神论者，所以邪恶从一个人传播到另一个人身上了。但是如果你赞同这个看法，我就得说了：你对科学的了解比不上我对宗教的了解。

另一个可能的答案是：孤陋寡闻是很危险的，这个青年人才学了一点点皮毛，却自以为知道了一切。但是不久他就会抛弃这种一知半解的诡论，重新认识到这世界其实复杂得多，于是他又会重新接受这种看法：神一定是存在的。

我不认为这个青年人必然会抛弃对神的怀疑。我们有许多科学家—这些人自认为是思想成熟的人，但他们也同样不相信神灵。实际上，正如我后面要解释的那样，答案不是那青年人自以为懂得了一切，而是恰恰相反。

你得到的第三个答案可能是这个青年人其实没有正确地理解科学。我不相信科学能够反驳神的存在，我觉得这是不可能的。如果科学不能证明神的存在为伪，那么是否意味着信仰科学和信仰一个神—宗教普遍意义上的神—有可能和平并存？

是的，和平共存。尽管我说过半数以上的科学家不信上帝，但是也有许多科学家确实既相信科学又信奉神，而且一点儿不冲突。但是，这种相容性尽管可能，却不容易达到。我下面想讨论两件事：为什么说这种境界不容易达到，以及这是否值得我们去努力？

当然，在我说“信奉神”时，这儿总是有个疑惑—神是什么？我指的是那种人性化的神，具有西方宗教的特征；它是你祈祷的对象，是创世

者，并在道德上指引你。

对一个学生来说，当他学习科学时，在试图把科学和宗教兼收并蓄时有两个困难。其一：存疑是科学的基本要求，让不确定性成为你内在本性的一个部分，这对科学的进步来说，是绝对必要的。为了更好地理解世界，我们必须保持谦逊，必须接受自己的无知。世事无定论，也没有什么事是确凿无疑的。你因为好奇而去调查研究，是因为它是未知的，而不是因为你知道现成的答案。当你对某一个学科的认识更深一些时，这并不意味着你发现了真理，而是意味着你发现这个或那个更有可能性，或者更没有可能性。

这就是说，随着研究的深入，我们会发现，科学表述的不是什么是对的或什么是不对的，科学表述的是不同程度的确定性："某一样东西对的可能性远远大于错的可能性"，或者"某一样东西几乎可以确定，但是仍有一点点疑问"，或者另一个极端—"这个，我们真的不知道"。任何一个科学概念，都是处在绝对谬误和绝对真理之间的不同阶段，而不会处在两个极端。

我相信，接受不确定性这个观念是非常必要的，这不仅是为科学负责，也是为其他的事情负责，承认自己的无知很重要。事实上，在我们的人生中，每当我们做一个决定时，我们不一定要知道我们是在做一个正确的决定，我们只是想，我们要做得尽可能好—这是我们应该做的事情。

不确定的态度

我想，当我们确认自己是生活在不确定之中时，我们应该接受它，承认我们不知道很多问题的答案，这对我们很重要。这种内心的态度—这种不确定的态度，对科学家来说是至关重要的，这也是一个学生首先要学习的态度。它会变成一个思考的习惯，一旦拥有这个态度，你就再也不可能丢弃它。

然后我们就看到，那个青年人开始怀疑每一件事情，因为他不能把任何说法当作是绝对真理。于是，那个问题就有了细微的变化，从“神存在吗”变成“神存在的可能性有多大”这个非常细微的变化其实是一记重拳，宣告了科学和宗教开始分道扬镳。我不相信一个真正的科学家还能用没学科学之前的那种方式去信奉神。虽然有科学家信奉神，但是我不相信他们对神的认知会和宗教人士一样。如果他们认为信教与他们从事的科学工作不抵触的话，我想他们会对自己这么说：“我几乎可以确定有神灵存在，可疑性很低。”这和说“我知道有一个神灵存在”是很不一样的。我不相信一个科学家有那种观点—那种纯粹的宗教式的理解，把神灵的存在当作真理—宗教人士特有的、那种绝对肯定的认知。

当然，这个怀疑的过程并不总是以否定神的存在开始的。通常情况下，特殊的宗教信条，比如来生的问题，或宗教学说的细节，比如耶稣的生活细节，会首先被拿来仔细考证。这种方式更有意思，以这样一种简单明了的方式直击核心问题，进而探讨神是否真的不存在。

一旦人们放弃绝对化问题的争论，转而用不确定性来考虑问题，情况就会有很大改观。大多数情况下，得到的答案是“非常接近肯定”；而另一方面，对有些问题来说，比如那个年轻人父亲对神的看法—细致考察后的这个最终结果，即便是“非常接近肯定”，也许就相当于宣告它几乎就是根本错误的。

信奉神灵VS科学事实

我们因此面临这样的难题：在我们的学生试图将科学和宗教结合时遇到的第二个问题：为什么信奉神灵最终常常被认为是很不理智、很不可能的—至少对宗教信仰中的神灵如此？我认为答案取决于他掌握的科学知识—那些知识到底是正确的，还是部分正确的？

比如，宇宙的浩渺给人留下了非常深刻的印象：我们身处一个围着太阳旋转的小天体，飘浮在拥有千亿颗恒星的银河系中，而银河系本身只是10亿个星系中的一个。

还有，生物学意义上的人类与动物有很密切的关系，两者不过是不同形式的生物体。在波澜壮阔的进化舞台上，人类只是一个后来者，其他生物怎么可能仅仅是为了人类的出场而搭的“脚手架”？

再者，所有的东西看起来都是由原子构成的，遵循一些亘古不变的定律。没有什么例外，星体是由原子构成的，动物也是由原子构成的，但是组合形式这么复杂，甚至神秘到无可复加—我们人类自己就是一个例证。

超越人类自身去思考这个宇宙，思考假如没有人类存在宇宙的意义，这是一个伟大的冒险—因为宇宙漫长的历史中有很长一段时间是没有人类存在的，而且浩瀚宇宙间有人类存在的地方也很少。当我们最终拥有这种客观的宇宙观，并且能够欣赏物质的神奇和庄严之后，再回过头去客观地看待人类—人也不过是一个物体，生命是这个宇宙中最神秘的一个组成部分，我们会有一种新奇的体验。这样的观察结束后，我们往往会开怀大笑，虽然努力去寻求答案，看似一无所获，这个过程却让我们很欣喜。这些科学见解无一不让我们感到敬畏与神秘，它们有太多的不确定性，但是它们又显得那么深刻，令人难忘。相比之下，那种理论—认为宇宙间一切安排只不过是搭了个舞台，台上的人们在善恶间挣扎，而神灵在云端观看—似乎就不那么尽善尽美了。

现在设想一下，那个学生，也就是我们前面说到的那位年轻人，就处在这样的情况下，他对科学的信念逐渐加深，所以他相信，一个人的

祈祷是不会被神听到的（我不是想要证明神不存在，我是想提醒大家注意一点，可能大家也有同感，为什么那么多人会认为祈祷毫无意义）。而这种怀疑的结果，必然导致伦理成为下一个被怀疑的对象。因为在他所学的宗教里，行为道德规范是和神灵的神谕联系在一起的，如果神灵不存在，该怎么看待神灵劝诫教徒的话呢？但是，我觉得，令人相当惊喜的是，道德问题可以说最终没有受到什么冲击。起初，那个学生可能认为这套道德规范在有些地方说得不对—问题很小，之后，他会时常推翻自己原有的观点，而到了最后，他的道德观念没有什么根本性的变化。

这样看来，这些道德观念有一定的独立性。最终，我们可能一方面怀疑基督的神圣性；一方面又坚信，善待邻居是一件好事，因为这样他也会这样善待你。一个人同时具备这两种信念，这并不冲突。我得说，我希望你们发现：我的那些持无神论的、从事科学研究的同行，通常在社会上都是道德高尚的人。

尽管科学对许多宗教观念有一些冲击，但它对道德层面的内容没有影响。宗教包罗万象，几乎所有的问题宗教都会给出答案。首先，它回答了这些问题：事物的本质是什么？它们从哪儿来？人是什么？神灵是什么—神灵的本质是什么？我把这称作“宗教的形而上学层面”。它还教导我们另一件事—行为规范。我是指，除了一些特定场合的行为规范和该执行什么样的仪式等等内容，它还指导我们在日常生活中如何为人处世，做品行高尚的人。在道德问题上，宗教也给出了答案，制定了道德和伦理的规范，我称之为“宗教的伦理学层面”。

现在，我们知道了，即便确立了道德标准，人性也是有弱点的，为了让人们能问心无愧，必须时常提醒他们要遵循道德规范。这件事没有那么简单，不仅仅是一个人有没有正确的道德认知的问题，你还要坚持去做你知道的那些正确的事情。我们需要宗教给我们力量和慰藉，鼓励我们去遵循这些道德规范。这是“宗教的感化层面”，它不仅规范人们的道德行为，还给艺术和很多伟大的思想提供了灵感。

内在联系

宗教的这三个层面是有内在联系的。考虑到它们密切的内在联系，人们通常认为攻击这个体系的某一个方面就等于攻击整体。宗教这三个层面的联系特点大体如下：道德层面，道德规范，这是神灵的神谕，这里涉及形而上学的问题。然后就有了宗教对人的感化作用，因为人要努力贯彻神灵的意志，一方面是他为神灵效劳的缘故；另一方面，他会感到自己与神灵同在。这是一种巨大的鼓舞，因为这使他的行为与世间万物就有了一种普遍的联系。

所以这三个层面有着十分密切的内在联系。麻烦的是，科学有时候和宗教的第一个层面—宗教的形而上学—会发生冲突。比如，人们过去曾经争论地球是否是宇宙的中心—地球是绕着太阳转，还是静止不动？这其中发生过可怕的冲突，科学的突破困难重重，但是这个问题最终还是解决了—在这件事上，宗教败退了。离我们时间稍近一些的冲突，是围绕人是否有动物祖先这个问题产生的大辩论。

很多此类的大辩论，最终都以宗教的形而上学的观点的退败而告终。尽管如此，宗教并没有就此一蹶不振。还有，宗教的道德观念似乎没有发生明显的或根本的变化。

不管怎么说，地球是绕着太阳转的—宗教最好还是转过另一边脸（让人打），难道不是吗？地球是静止还是绕太阳运转，这有什么关系？我们可以预期，还会有别的冲突出现。科学在发展，总会有一些新的发现，而他们将会挑战和质疑当前某些宗教的形而上学的理论。实际上，即使宗教在过去已经节节败退，对于某些人来说，在他们同时学习科学知识和聆听宗教说教时，他们内心的冲突是确确实实存在的。两者没有协调好，现实的冲突仍然存在，然而，道德观念并没有受到影响。

事实上，在宗教的形而上学层面，冲突的严重程度加倍了。首先就是客观现实与教义的冲突。即使不存在这种冲突，两者对待这些问题的态度也大相径庭，所以也可能产生冲突。在形而上学问题上，一方是科学中的不确定精神，另一方是宗教要求的绝对确定性和无条件信仰，两者相去甚远。我相信，在宗教的形而上学层面，不管在客观现实还是各

自秉承的精神方面，科学和宗教肯定会有冲突。

照我的看法，宗教不可能发现一套能够保证不会与科学产生冲突的形而上学观点，因为科学是永远在发展，而且总是处在变化中，它一直在向未知的领域进军。我们不知道怎样回答一个问题，我们不可能发现这样一个答案—它永远不会在将来某一天被发现是错的。科学和宗教都在努力回答同一个范畴的问题，冲突自然在所难免。

科学和道德问题

另一方面，在伦理的层面，我不相信宗教和科学会发生真正的冲突，因为我相信伦理问题不在科学的范畴之内。

我用三个理由来证实我的看法。第一，在形而上学层面，过去科学和宗教已经发生了不少冲突，然而原有的那一套道德观念并没有崩溃，也没有改变。

第二，有这样一群好人，他们遵循基督教的伦理道德，却又不信教。他们觉得这样做并没有什么冲突。

第三，尽管我相信，科学界的一些发现可能时不时被人们拿来证明宗教的合理性，比如，这些科学发现被当作基督生前创造的“神迹”的证据，或者被用来印证宗教的其他形而上学的观点。但是在我看来，没有什么科学证据会影响《圣经》上为人处世的黄金律（即“你们希望别人怎样对待你们，你们也要怎样对待别人”）。在我看来，这二者有所不同，一定要把它们联系在一起有些牵强。

现在让我们来看看，我能否就此做一些哲学层面的解释—为什么科学不能影响道德的根基？

一类典型的与人有关的问题，一类各种宗教努力回答的问题，通常是这种句式：我该不该做这件事？我们该不该做这件事？政府该不该做这件事？为了回答这类问题，我们可以把它分解成两个部分：（一）如果我做这件事，会有什么结果？（二）我希望这样的结果发生吗？它对我有什么影响—对我有好处吗？

“如果我做这件事，会有什么结果？”这种形式的问题，严格地说，是一个科学问题。事实上，科学可以被定义为：只为试图回答上述句式的一类问题的一种方法以及通过这个过程获得的所有信息总和。从根本上来说，这种方法就是：试一试，看看会有什么结果；然后你再把从这些试验中获得的大量信息收集到一起。所有科学家都会同意，一个问题—任何一个问题，不管是哲学的或是其他什么问题—如果不能以那种可

以用实验验证的句式表述（或者，简单来说，不能用这种形式表达：如果我做这件事，会有什么结果？），它就不是一个科学问题，它就不在科学的范畴内。

我断言，不管你是希望发生什么事，还是不希望发生什么事—这件事发生了有什么价值，以及你如何评判这个结果价值（这是“我该不该做这件事？”这个问题的第二个部分）—这些问题肯定都在科学的范畴之外，因为这不是一个仅仅凭你知道会发生什么事就能够回答的问题，你还不得不从道德的角度去评判发生这件事的后果。因此，从理论上讲，两者并不属于一个范畴。所以我认为，道德评判—或者说宗教的伦理—和科学的信息完全没有什么关联。

转到宗教的第三个层面—感化层面，这是我想向虚拟的研讨会陈述的中心问题。当今，任何一种宗教具有的感化作用的来源—给予力量和安慰—与其形而上学的层面是密切联系的，也就是说，感化和激励众生的缘由在于人在为神工作，服从神的意志，他感受到和神同在。在这个基础上建立起来的、遵循道德规范的情感纽带，由于怀疑神灵的存在，开始被严重削弱—哪怕是有一丁点儿怀疑神灵的存在。因此，当人对神的崇拜开始动摇时，这种特殊的感化手段也就失效了。

我不知道如何回答这个中心问题—既要维持宗教的现实作用，以此作为大多数人力量和勇气的源泉，同时又不要求人们全盘相信宗教的形而上学理论。

西方文明的传统

在我看来，西方文明有两个伟大的传统作为基石。一个是科学的探险精神—这是对未知领域的探险，为了探索真理，人们必须承认自己的无知—“知之为知之，不知为不知”，对于未知的事物如此，对于未知的宇宙奥秘也是如此，坚持“一切都是不确定”的态度，概括起来一句话：智者的谦逊。另一个伟大的传统是基督教伦理—以爱作为行为基础，视所有人为兄弟，尊重个体的价值—这是精神层面的谦虚。

从逻辑上讲，这两个传统完全不矛盾。但是逻辑不是一切，人的心灵需要追随一个理念。如果人们回归宗教，他们放不下的是什么呢？一个怀疑上帝的人，甚至不相信上帝的人，现在的教堂是一个能给他安慰的地方吗？现在的教堂是一个能够给予这种怀疑的观点安慰和鼓励的地方吗？迄今为止，我们不是都在借互相攻击对方来汲取力量和安慰，以此维持科学传统或宗教传统吗？而它们二者原本都是西方文化传统中互为一体的组成部分！这种情况可以避免吗？我们怎么才能获得启示，使西方文明的这两个支柱充满活力、互相支持，而不互相倾轧？这不正是我们这个时代的中心问题？

我把这个问题提交给研讨会讨论。

鸣谢

《发现的乐趣》一文是费曼的电视访谈的文字稿，该访谈节目后在BBC2台的《地平线》栏目播出，节目名为《发现的乐趣》。此次重印出版得到该节目制作人克里斯多佛·萨爱克斯及费曼家属卡尔·费曼和米歇尔·费曼的授权。

《关于计算机的预言》被收入《纪念仁科演讲文集》，最初于1985年发表。此次转载出版承蒙“纪念仁科基金会”的代表K.仁科教授的许可。

《从加入“曼哈顿计划”到亲眼看到原子弹爆炸》最初发表在加州理工学院的《工程和科学》杂志。已获准转载。

《科学文化在现代社会中扮演什么角色？应该扮演什么角色？》由意大利物理学会授权转载。

《底下还有大量的空间—对纳米技术的展望》最初发表在加州理工学院的《工程和科学》杂志。已获准转载。

《科学的价值》选自《你干吗在乎别人怎么想》一书。

该书记录了理查德·费曼和拉夫·莱顿的谈话。版权©1988属于格温妮斯·费曼和拉夫·莱顿。由W.W.诺顿出版公司授权转载。

《科学是什么》由《物理教师》授权重印，原文发表在《物理教师》第九卷，313—320 页。版权©1969属于美国物理教师协会。

《世界上最聪明的人》由Omni杂志授权转载，版权©1992属于奥美尼国际出版公司。

《货拜族科学：探讨科学、伪科学以及学习如何不自欺》最初发表在加州理工学院的《工程和科学》杂志。已获准转载。

《就像1，2，3那样简单》选自《你干吗在乎别人怎么想》一书。该书记录了理查德·费曼和拉夫·莱顿的谈话。版权©1988属于格温妮斯·费曼和拉夫·莱顿。由W.W.诺顿出版公司授权转载。

《科学和宗教的关系》最初发表在加州理工学院的《工程和科学》杂志。已获准转载。

I　还有一件最激动人心的事情—如果不是我生命中最激动人心的事情，那也至少是我编辑生涯中最激动人心的事情—发现了20世纪60年代初费曼在华盛顿大学做的三次演讲的文本，它们尘封已久，从未公开发表过。这些演讲文稿后来被编辑成书《所有这一切的意义》（The Meaning of It All，台湾天下文化出版社2005年出版译作时，书名为《这个不科学的年代》—译者）。但是，那只是因为找到某些东西而快乐，而不是探究事物真相的快乐。—编者

1　洛斯阿拉莫斯（Los Alamos）位于美国的新墨西哥州，“二次大战”后期，闻名世界的美国原子武器研究基地—洛斯阿拉莫斯国家实验室在此建立。—译者

2　罗伯特·奥本海默（J. Robert Oppenheimer 1904—1967），美国犹太人物理学家、曼哈顿计划的领导者　。1945年主导制造出世界上第一颗原子弹，被誉为“原子弹之父”。—译者

3　汉斯·贝特（Hans Bethe 1906—2005），美国犹太人物理学家，因其对核反应理论的贡献，尤其是发现了恒星的能量来源，获得1967年诺贝尔物理学奖。—译者

4　1965年，费曼与朱利安·施温格、朝永振一郎共同获得诺贝尔物理学奖，获奖原因是他们对量子力学的巨大贡献，以及对基本粒子物理学产生的深远影响。—编者

5　汤川秀树（1907—1981），日本物理学家，1949年以介子学说获诺贝尔物理学奖，是日本获诺贝尔奖第一人。—译者

6　仁科芳雄（Yoshio Nishina 1890—1951），主要从事原子核物理学理论及实验研究，以及对宇宙射线的研究，是日本原子物理学的开拓者，他培养出了以汤川秀树、朝永振一郎为首的多名世界知名的理论物理学家。—译者

7　冯·诺依曼（John von Neumann 1903—1957），匈牙利裔美国数学家，被尊为计算机之父冯诺依曼体系是现代计算机的通用架构。主要特点是：（1）数据和指令不加区分的都用二进制表示；（2）指令一条一条地顺序执行；（3）由运算器、控制器、存储器、输入和输出设备五部分组成。—译者

8　布朗运动：由于分子不断随机撞击造成的粒子的无规则运动。1828年，该名称首次在植物学家罗伯特·布朗的文章中出现。1905年，阿尔伯特·爱因斯坦在《物理学年鉴》撰文中对布朗运动的原理做了解释。—编者

9　今天，这样的机器已经被发明出来。阿尔法围棋（AlphaGo）是一款围棋人工智能程序，由谷歌开发，这个程序利用“价值网络”去计算局面，用“策略网络”去选择下子。2016年3月阿尔法围棋对战世界围棋冠军、职业九段选手李世乭，并以4:1的总比分获胜。——译者

10　研制第一颗原子弹的庞大计划名为“曼哈顿计划”，这个计划始于1942年，结束于1945年8月6日和9日，两颗原子弹分别在广岛和长崎成功爆炸。参与曼哈顿计划的机构遍布美国，其中有芝加哥大学、华盛顿州的汉福德原子能研究中心、田纳西州的橡树岭国家实验室和新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯国家实验室—原子弹就是在这儿制造的，实际上它也是整个计划的司令部。—编者

11　鲍勃·威尔逊（Robert R. Wilson 1914—2000），费米国家加速器实验室的第一任主任，1967—1978年在任。—编者

12　美国新墨西哥州南部的城市，1945年7月16日，世界上第一颗原子弹在距离这里96千米的特里尼蒂发射场试爆。—译者

13　圣非（Santa Fe），新墨西哥州的州府。—译者

14　恩利克·费米（Enrico Fermi 1901—1954），因其证实了中子轰击会产生新的放射性物质及相关问题，被授予1938年诺贝尔物理学奖。1942年12月，芝加哥大学启动了世界上第一个可控核反应堆，他是负责人。—编者

15　尼尔斯·玻尔（Niels Bohr 1885—1962），因其对原子结构及原子辐射的研究，获得1922年诺贝尔物理学奖。—编者

16　阿格·玻尔（Arge Bohr 1922—2009），1975年诺贝尔物理学奖获得者，他与本·莫特尔森和詹姆斯·雷恩沃特因原子核结构理论一起获得当年的诺贝尔物理学奖。—编者

17　Trinity Test是第一次原子弹试爆试验的代号。Trinity，（基督教）三位一体。—译者

18　贝尔纳蒂尼教授（Benaedini）是该会议主席。—编者

19　阿道司·赫胥黎（Aldous Huxley 1894—1963），英国作家，父亲是生物学家，1932年创作的长篇小说《美丽新世界》是其代表作。该书主要描绘了科学主义的乌托邦，在机械文明下的未来社会中，人的“人”性被机械剥夺殆尽，处于“幸福”状态的人们以几种种姓产生于工业化的育婴房，接受种种安于现状的教育，热爱机械化的工作与生活方式的未来生活。—译者

20　CP守恒：电荷和宇称守恒，这是物理学最基本的一个守恒定律，宇称是亚原子粒子的一种内在对称属性，该理论认为粒子相互作用前后的电荷和宇称总量保持不变。—编者（演讲当时CP守恒还被认为是正确的，但是就在1964年詹姆斯·克罗宁和瓦尔·菲奇实验发现在弱相互作用下CP不守恒，为此他们于1980年获得诺贝尔奖。—译者）

21　其实那个人名是Immanuel Velikovsky，《冲突的世界》1950年由纽约双日出版社出版。—编者

22　卢尔德（Lourdes），法国南部小镇，位于接近西班牙边界的波河（Gave de Pau）的岸边，传闻圣女马利亚曾在此地指引一女孩找到能治愈疾病的泉源，因而闻名世界。—译者

23　兰德公司（Rand　Company），是美国最重要的以军事为主的综合性战略研究机构。——译者

24　卡默林·翁内斯（Heike Kamerlingh Onnes 1853—1926），因研究物质在低温条件下的性质获得1913年诺贝尔物理学奖，其研究帮助人们制成液氦。—编者

25　珀西·布里奇曼（Percy Bridgman 1882—1961），因发明产生超高压的装置及其在高压物理领域的深入研究获得1946年诺贝尔物理学奖。—编者

26　1埃＝1/1010米，即1/10纳米。—编者

27　范德华力是原子或分子之间微弱的吸引力，其发现者范德华（Johannes Diderik van der Waals 1837—1923），荷兰物理学家，因其对气体和液体的状态方程的研究获得1910年诺贝尔物理学奖。—编者

28　放射性同位素热电式发电机（Radioisotope　Thermoelectric Generator）。—译者

29　喷丸处理也称喷丸强化，是一种表面处理工艺，用于提高零件的疲劳强度，大型壁板零件成型以及清除零件表面氧化层等。——译者

30　威廉·哈维（William Harvey 1578—1657），发现了人体的血液循环系统。—编者

31　即希腊小写字母π。—编者

32　默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann 1929—），因其在基本粒子的分类及相互作用研究方面的贡献和发现，获得1969年诺贝尔物理学奖。1954年盖尔曼和茨威格（G. Zweig）引入了夸克的概念。—编者

33　描述亚原子粒子间各种相互作用的粒子物理学理论。—编者

34　威利斯·兰姆（Willis Lamb 1913—2008），因发现氢光谱的精细结构，1955年获得诺贝尔物理学奖。—编者

35　罗伯特·雷瑟福（Robert C.Retherford 1912—1981），美国物理学家，1947年他与兰姆在实验中发现了氢原子内的能量分离（兰姆移位），此项实验推动了量子电动力学的发展。—编者

36“色夸克”的“色”是科学家给夸克和胶子的某一种特性起的一个名字，不是因为它们真的有颜色，而是因为找不到更好的名字来命名基本粒子的一种新特性。—编者

37　威廉·汝恩·汉密尔顿爵士（Sir William Rowan Hamilton 1805—1865），爱尔兰数学家，他发明了四元数，这是张量和向量分析的一个替换结构。—编者

38　沃尔夫刚·泡利（Wolfgang Pauli 1900—1958），由于发现了不相容原理获得1945年诺贝尔物理学奖。—编者

39　埃尔温·薛定谔（Erwin SchrÖdinger 1887—1961），由于他发现了新的、卓有成效的原子理论，获得1933年诺贝尔物理学奖（和狄拉克一起获奖）。—编者

40　位于加利福尼亚大苏尔的伊莎兰研究院(Esalen Institute)。—译者

41　货物崇拜（Cargo Cult）是一种宗教形式，尤其出现于一些与世隔绝的落后土著之中。当货物崇拜者看见外来的先进科技物品，便会将之当作神祇般崇拜。“货拜族科学”（Cargo Cult Science）这个词是费曼在这篇演讲中自创的一个词，用以形容徒具科学外表却并不遵循科学方法的活动。——译者

42　拉比是犹太人中的一个特别阶层，是老师也是智者的象征，担任犹太人社团或犹太教教会精神领袖或在犹太经学院中传授犹太教教义，主要为有学问的学者。—译者

43　约翰·阿奇博尔德·惠勒（John Archibald Wheeler 1911—2008），物理学家，因为发明了“黑洞”这个词，从而为大众所知。—编者

44　尤金·维格纳（Eugene P. Wigner 1902—1995），1963年被授予诺贝尔物理学奖，以表彰他在对称性原理上的研究成果对原子核和基本粒子理论的贡献。—编者

45　以理查德·查斯·托尔曼（ Richard Chace Tolman）名字命名的教授职位。—译者



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

未读 UNREAD

UNREAD

探寻天文学中震撼心灵的人文精神

THE SOUL OF THE NIGHT

给仰望者的天文朝圣之旅

Chet Raymo

AN

道出你被星空震撼时无以言表的感动

科普版《瓦尔登湖》，让天文学浪漫如诗

与梭罗、陶渊明、雪莱、里尔克、爱默生精神相通

在神话、文学、宗教、历史、人类学间穿梭徜徉

美国30年经典科学美文首次引进，值得在夜深时一读再读

THE SOUL OF THE NIGHT：AN ASTRONOMICAL PILGRIMAGE

〔美〕切特·雷莫——著 高爽——译

北京联合出版公司

版权信息

给仰望者的天文朝圣之旅

THE SOUL OF THE NIGHT: An Astronomical Pilgrimage

作者：[美] 切特·雷莫（Chet Raymo）

译者：高爽

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

Published by agreement with the Rowman & Littlefield Publishing Group through the Chinese Connection Agency, a division of The Yao Enterprises, LLC.

Simplified Chinese edition copyright © 2019 by United Sky (Beijing) New Media Co., Ltd. All rights reserved.

目录

版权信息
前言
1　寂静
2　在黑暗的时光里
3　微光
4　夜行动物
5　万物之初
6　古老的光辉
7　蛇与阶梯
8　星尘
9　脚下红尘滚滚的平原
10　隐藏的物质
11　水塘中的怪物
12　夜晚的数字
13　颜色的甜言蜜语
14　昴星团的追随者
15　夜晚的形状
16　仲冬夜之梦
17　仁慈、温和的地球
18　等待彗星
19　慢慢的黑暗
20　飞鸟与鱼
致谢
译后记
返回总目录

献给莫琳

前言

对人们最常提出的关于宇宙的“大”问题，现代天文学提供了谨慎的回答。宇宙是什么？宇宙从哪里来，将要到哪里去？宇宙是由什么组成的？以及，在大地之上，像萤火一样在物质表面起舞的、名为生命的东西，又是什么？

这些来自新天文学的回答，向我们展现了与人类尺度极不相称的时空。在这之中，包括多如恒河沙的恒星，每一颗（可能的）潜在的温暖的行星，或是其他充满了生命的星球；包括星系——千亿颗恒星于星云中诞生，又在壮烈的爆炸中死亡；包括或斑斑点点或如丝如缕的星系集团，跨越数光年甚至数十亿光年，好似窗外光线下飞舞的微尘；还包括世界的边缘，让我们得以抵达最初的那个无中生有、创造万物的时刻。

很多人容易被新天文学吓到，更愿意躲进无知的舒适区里。但是，如果我们真的对“我们是谁”这样的问题感兴趣，就必须足够勇敢地接受感观和理性告诉我们的一切；必须进入充满星系和天文数字的宇宙，甚至冒着承受精神眩晕的风险，了解我们最终必须得知的一切。

但是，如同博物学家约翰·巴勒斯[1]所说，了解只是一半，而爱是另一半。接下来的这些篇章是知道和热爱的练习，是一个人进入黑暗和寂静的夜空中探寻人生意义的朝圣之旅。探寻的回报是瞬间的顿悟、神赐般的启示，以及与一种比我们更伟大的事物的短暂邂逅——那是一种力量，一种美，把我们引入对最遥远天体的狂喜的沉思中。偶尔，如果我们足够幸运，还可以得到一个令人惊叹、超乎寻常的夜晚。用诗人杰拉尔德·曼利·霍普金斯[2]的话说，这样的夜晚“如抖动的银箔般闪耀”。

这趟旅程，我们每个人都必须独自前往。进入恒星和星系的王国，触碰宇宙的极限，抵达时空的边界。在那里，我们的心灵会接触终极的秘密，和已知的不可知相遇。这是一场探寻夜之魂的朝圣之旅。

1　寂静

昨天在波士顿的大街上，我看到一个年轻人滑着滑板撞了一个小孩儿。滑板冲入人行道，朝着一个小女孩全速直撞过去。我当时就在现场，在一个不太近也不太远的位置上看到了发生的一切。一切发生得悄然无声。一切发生在死寂之中。吓坏了的孩子试图躲避冲撞，她的哭声，她的妈妈在那一刻的尖叫声，都被灰色羊毛般昏暗的11月天空吸收掉了。孩子的身体毫不费力地腾空而起，缓慢运动，宛如在梦中飘浮，然后跌落，撞到人行道上，两次。就像一个皮球，弹跳，然后静止。

所有这一切发生的时候，安静极了，就像是我正在用天文望远镜观看一幕发生在另一颗行星上的悲剧。我曾观测太空中的恒星爆炸，巨大的、行星状碎裂的、几光年远的场面，透过眼前望远镜冰凉的玻璃镜片呈现，绝对寂静。我在波士顿的大街上目睹的场景给我的感受就像那次观测一样。

就在那孩子腾空而起的时间里，地球携着她向东自转了800米，地球相对太阳的运动又让她反过来朝西移动了64千米。在银河系的所有恒星之中，太阳系带着她飘移，悄无声息地朝着织女星的方向运动了32千米。她也乘着围绕银河系的转轮行过480千米，环过中心闭合成一个完美的圆。在穿越宇宙的壮丽飞行结束后，她撞回地面，又像个皮球一样弹起。她升向空中，在银河系中漫游，再跌落人行道上。

似乎有一层薄膜把我们和混乱隔绝开来。孩子被滑板撞飞，缓慢运动后静止下来。这期间存在一个漫长的间歇。鸽子在灰色的天空中冻结，人行道上漫步的行人呆若磐石，培根大街的交通停滞。小女孩的身体安静地躺在柏油路面上，就像一张发皱的报纸。妈妈的哭喊声迷失在星辰间的虚空里。

我们要如何理解宇宙的寂静？有人说，陨石进入地球大气层的时候，肯定会呼啸着四分五裂。但在地球的大气层之外，星空依然不声不响。星系中燃烧的灌木没有发声。银河流淌过夏夜黑暗的浅滩，也没有激起易被察觉的波纹。恒星自己吹散星风，发出的声响我们无可辨析。几百万个太阳系被银河系中心的黑洞吸入，像羽毛飘落一样无声无息。宇宙在大爆炸中开始膨胀，创世的火球悄悄地释放出无限能量，像根终极的爆竹一样。这里没有任何声迹。薄膜破裂了，一个孩子飞越半空，宇宙保持沉默。

在耶稣受难日和复活节之间的天主教教堂里，钟声也是沉默的。遵循欧洲12世纪的习惯，大钟被“黑暗乐器”所替代，木头发出的噼啪声响

和其他东西产生的噪声，都提醒着信徒们声音所带来的恐惧，那总会让人联想到耶稣基督之死。人们无法相信神会死去，而天堂竟然对此保持沉默。果然，闪电击中耶稣受难的加略山。神殿轰响着出现裂隙。大地震动，岩石迸开，群星仍在闪烁。这喧响与雷电，根据中世纪的风俗，是人们在复活节的仪式上用木器制造出来的。

可是，昨天，在波士顿的大街上，一个孩子腾空而起，天空对此无动于衷。我听着，把愤怒的感官音量开到最大，可却什么也没能听到。

※

米开朗基罗·安东尼奥尼的电影《红色沙漠》中有这样一个场景：一个女人走进建筑工地，男人们正在那里建造大型射电望远镜阵列。“这些是做什么的？”她问。其中一名工人回答：“它们用来听星星的声音。”“哦，”她懵懂又热切地惊叫，“我能听听吗？”

让我们听听。让我们把花费数百万美元建造的望远镜连接上厨房里的收音机，然后将恒星辐射的能量转化为声音。我们会听见什么？各种元素随机产生的爆裂声，恒星大气中的电子能级跃迁产生的静电声，氢的嗡嗡声，试图遵循量子物理随机率的物质产生的嗞嗞声和噼啪声——随机的、统计的、无关紧要的噪声，就像忙碌蜂巢里传出的争论或是海浪拍打木板发出的叹息。

我读高中的时候，在玻璃罐中做过一个电铃实验。电铃悬挂在罐子里，电线通过将瓶口密封住的橡胶塞上的小孔与电源连接。打开电铃的电源让它响起来，然后抽出玻璃罐子里的空气。慢慢地，电铃的声音逐渐消失了，而铃舌还在如静默的刺青针般敲击着。我们观察着铃舌在真空中无声地拍打，就像看到一只飞蛾在窗外用柔软的翅膀击打着玻璃。

和玻璃罐中的真空相比，恒星之间的空间更加空旷。恒星之间的空旷是难以想象的浩瀚。如果太阳是波士顿的一只高尔夫球，地球就是4米远的针尖儿，而最近的恒星——半人马座α——将是辛辛那提的另一只高尔夫球（它是三星系统，所以实际上是两只高尔夫球加上一粒豌豆）。和恒星本身的尺寸相比，恒星之间的距离是如此遥远：在波士顿的一只高尔夫球；在辛辛那提的另两只高尔夫球与一粒豌豆；在迈阿密的一颗玻璃球；在旧金山的一个篮球。恒星之间的广袤无垠没有道路相连，只有比如今地球上能够制造出的更加完美的真空。银河系中，我们所在的这个区域里，星际空间中每立方厘米仅含有大约一个物质原子，也就是说，每个原子占据着一块方糖大小的空间。星际空间的寂静真空要比玻璃罐子中的真空密集一百万倍。在这几乎完美的真空中，恒星爆炸，陨石在卫星上撞击，行星分崩离析，这些动静都不会比玻璃罐里跃动的电铃更响亮。

我曾经通过一架性能强大的望远镜观测蟹状星云。那星云是恒星爆炸后正在扩散的残骸，残存的外圈物质扩散到8光年宽，距离我们5000

光年远。我当时在望远镜里见到的东西，充其量就是一块模糊的小光斑，与其说是一颗正在消亡的恒星，倒不如说更像是目镜上的一小片被烟熏过留下的污迹。通过望远镜看它，一半靠视觉，一半靠想象。在模糊的光斑中，我很容易想象到向外扩散的激波、高能辐射的包层、撕裂的气态细丝，以及死亡恒星破碎和脉动的遗迹。我的目光紧贴着望远镜目镜停了一刻钟的时间，我体验到强烈的能量释放感，如同老房子倒塌在地基上，而炸药专家精确控制了掀起灰尘的方向。在看到蟹状星云的时候，我感觉自己应该戴上耳塞，像炮兵或是操作电锤的工人那样保护自己的耳朵。但实际上什么声音也没有。

中国古人见到了蟹状星云爆发的过程。公元1054年，金牛座出现了一颗新星。它接连燃烧几个星期，亮度超过金星，甚至在白天也足以被人们看到。之后，这颗星逐渐暗淡下去，直到消失不见。中国古人在史书中将其记录为“客星”。900年之后，爆发还在继续。我们将望远镜指向1054年金牛座出现“客星”的区域，就能看到喧腾的气体泡泡还在疾速向外扩张。

多丽丝·莱辛在她的太空幻想编年史的开头是这么说的：“我父亲，过去就这么坐着，一个小时接着一个小时，一夜接着一夜，坐在位于非洲的我家的门外，看着星星。‘那么，’他会说，‘如果我们爆炸了，也还有那么多的世界存在呢。’”[3]是的，即便它们当中现在或今后有那么一两颗爆炸了，也还有那么多呢。数万亿颗恒星遍布在真空的空间里，其中一颗在1054年爆炸了，中国人看到了；一颗在1572年爆炸了，第谷·布拉赫看到了；还有一颗在1604年爆炸了，开普勒看到了。它们都陷于令人敬畏的寂静。



宇宙在物理层面的寂静，对应着道德上的沉默。一个孩子在空中腾飞之后受伤，而星系继续围绕着各自的轴线有条不紊地旋转。但是，为什么我还心有不甘呢？在九天之外，不存在极乐世界，也没有众神在享宴之余一瞥人世间的疾苦。天外存在的，只是一个又一个遥远的星系，壮丽而安静地旋转着，高悬于上却对我们的生活漠不关心。星系的数量可能无穷无尽，我们的愤怒却不能每时每刻都持续。有限的生活，分配于无限的宇宙，结果已渺小到足以忽略不计。

从我居住的新英格兰村走到繁忙的主街只有几百米，奎塞特小溪蜿蜒穿过沼泽，看起来似乎就同我所希望的那样遥远。在11月顺流而下，会来到一片原始的寂静之地。溪水暗淡而迟缓，把柳树根和厚厚的箭头状绿叶搅动得像糖浆一样混浊。风在空中止步，鸟儿早已南逃。越野自行车在冬天被堆积起来，雪地摩托还藏在车库后面落灰。11月的这几个星期，奎塞特小溪附近的沼泽就像星际空间一样寂静。

我们对寂静的掌控十分脆弱。长途高速路上的货运车厢吱吱作响，有时这点噪声就足以打断梭罗的沉思。梭罗有足够的洞察力去了解，在

离瓦尔登湖不远处的菲茨堡铁路上鸣响的汽笛声除了预示着火车即将进站似乎还有更多的含义，但他几乎想不出如果科技扰乱我们原本自然宁静的世界会引发什么后果。梭罗迷恋猫头鹰。“它们的叫声，”他说，“和沼泽地与黄昏的树林特别般配。”在猫头鹰的叫声之间，只有深沉的、给人以启发的宁静。梭罗说：“它们的叫声之间夹杂着一种空旷的、未经开垦的自然，而人类还没能充分理解这些。”梭罗沉醉于这间隙的寂静，就像我痴迷于11月里沼泽的沉默不语。

在学生时代，我偶然读到马克斯·皮卡德的著作《沉默的世界》。这本书提供了相较于之前的我而言，对现在的我来说更有价值的视野。沉默，皮卡德说，是语言的源泉，并且，抑制语言的结果只能是将它反反复复地再现。只有与沉默相关，语言才有意义。这是皮卡德赐予的宝物。带着这一层面的沉默的意义，我的思绪回到了11月的奎塞特小溪旁的沼泽。沉默，这沉默让我面对恒星，面对默不作声旋转着的笨重星系，面对真空中上帝敲打大钟发出的叮当声响。恒星的沉默，是创造和再造的沉默。这样的沉默无法命名，这样的沉默只能被独自探索。沿着瓦尔登湖的岸边，猫头鹰啼鸣着发问，回答隐藏在鸣叫间隙的寂静中。那间隙短暂却无限深邃，夜之魂潜藏其中。

我乘独木舟沿着溪水顺流而下时竖起耳朵聆听，就像动物嗅探着风中食物或天敌的气息。我不确定在这沉默之外，在一切缺席的声响之外，我还想听到什么。可能是一声干涩的啼鸣，用诗人华莱士·史蒂文斯的话说：“屋外传来一声干涩的啼鸣……唱诗班C调唱得最好的歌者……还离得很远。”[4]是我所求的太多了吗？我不求肆意大作的铃声，也不求震裂神庙的惊雷。我只求远处柳树林里一声干涩的啼鸣，还有那遥远星系中丛丛柔荑的飒飒窸窣。



一个孩子被滑着滑板的年轻人撞飞，跌落在人行道上静止不动。鸽子在灰色的天空中冻结，人行道上漫步的行人呆若磐石。孩子的身体像发皱的报纸一样在那里躺了多久？我的心脏像真空中静默拍打的电铃一样跳了多久？可能是一分钟，也可能只有零点几秒。在这之后，世界本来的节奏恢复如初，人群潮水般聚集。有个人把受伤的孩子抱起来，和她的妈妈一起匆忙寻求帮助。好事者心烦意乱地散开。城市的喧闹声吞噬了公共空间，培根大街的交通再次运作起来。

2　在黑暗的时光里

小时候，有一次父亲把我从睡梦中叫醒，只为让我一睹彗星的光彩。他从收音机里听说，一颗彗星将在黎明之前几个小时的东方天空现身。我穿上拖鞋，披上夹克，跟着父亲来到院子里。瞌睡虫跟在我身后，像是彗星的尾巴。我们父子二人一同站在黑色的松树之间，仰头寻找着星夜中的小斑点。

在我记忆中残留的影像当下却清晰起来了。父亲其实并不知道彗星究竟长什么样子，也无法确定它会出现的精确方向，我们只能尽力在天空中找个大概。我猜测，他想象中的彗星拖曳着一条长长的光轨，会像天使降临时吹奏喇叭一样宣告自己的登场。他想象着滔天巨响和光芒四射。他期待着天际燃起火焰。他想让我看见这一切。

我们没能看见那颗彗星。可能对于天文学家来说那只是每年例行来访的十几颗彗星中的一颗，只能依靠双筒望远镜、天文望远镜或照相底片才能看得见。又或许，那颗对肉眼来说太暗的彗星就隐藏在松树之间，没有被我们发现。我们站在结霜般的冰冷空气中寻找着它，直到东方的天空晨光熹微。那一夜，给了我最初的关于群星的记忆。没有名字的、不可计数的、声势浩大的群星，像一张冰冷的渔网笼罩着松树林，美丽而令人畏惧。



美丽无非是恐惧的开端[5]，诗人赖内·马利亚·里尔克如此哀叹。今夜，我再次从黑暗中醒来，迷失在关于粗糙黑松林和无名群星的儿时梦境里。这是独处的时刻，绝望的时刻，像孤狼一样的时刻。我真切地感受到幽灵就栖身在阴影中，肉体的幽灵，心灵的幽灵。一时兴起，我起身穿过漆黑的房间，走入门前的庭院。在那儿，我逮到了冬季的猎户座，正偷偷溜过秋夜的天空。

巨人猎户座，他是大言不惭者、猎杀野兽者、呼风唤雨者。星光点缀在巨人隆起的肌肉处，北方夜空中再也没有哪块地方存在比它更明亮的可被观测到的星星。钻石般的参宿七是猎人的前脚，红宝石一样的参宿四是支撑着猎人抬起的手臂的肩膀。还有闪耀的参宿五和参宿六，它们是另一侧肩膀和另一只脚。参宿一、参宿二和参宿三是猎人腰带上的白珍珠。这几颗星中离我们最近的是参宿五，但470光年的路程比从地球到离我们最近的星球还要远上100倍。参宿六有2000光年远。它们都是银河系中的巨星，比我们的太阳明亮万倍，是夜空中最大、最耀眼的存在。这些巨星在夜晚用火舌回应着地上的黑松林。

父亲教会我认识并叫出猎户座群星的名字。他和我一起站在松树下，用手指着缠绕在大树枝头的巨人猎户的身影。他拿出一本书，书中有星图、恒星的信息和关于星座的故事。其中猎户座的故事是我最喜欢的。

历经千辛万苦，猎户奥利翁抵达了希俄斯岛，他在那里爱上了国王奥诺比安的女儿梅洛普。国王同意奥利翁娶自己的女儿为妻，但是坚持要他完成一系列困难的任务以证明他的决心。奥利翁每完成一项任务，国王就提出另一项新的，每次都要比之前的更困难。最终，奥利翁怀疑国王根本就没打算放走他的女儿，这考验永远也不会结束。他决定不再接受任务，还要强行带走梅洛普。但猎户的计划被国王发现了。奥诺比安把奥利翁抓起来，刺瞎了他的双眼，将他放逐到海边，让他只能在黑暗中徘徊。

猎户座的故事，是关于光明与黑暗的长篇史诗的一部分，它就像一条无源之溪，流过建立了多种文明的不同民族的记忆。史诗中的英雄总是一位战士，勇猛而英俊，身披祥云，衣着绚烂。他爱上了明媚的少女，最终却总要将她抛弃或杀害。他是旅行者。他是战胜了在丰饶土地上为非作歹的野兽和魔鬼的勇士。他是“千面英雄”，走入黑暗，再骄傲凯旋。

神话中猎户座的原型是太阳。这样的神话让蒙昧中的原始人类对太阳的季节性和周期运动的体验变得饱满——冬季和夏季，夜晚和白天，死亡和蜕变。在最早讲述故事的人的梦境里，失明了的奥利翁就是冬天或夜晚的太阳。巨人历经风雨，现在却步入黑暗。他一路蹒跚向西前行，盲目而孤独，被众神遗弃。老天无眼！众神扑灭了光明。他们扑灭了光明，却又像无事发生一样各回各家。奥利翁成了阴暗峡谷中独行的诗人，他是心灵的黑夜里的圣十字若望，他是步入歧途后迷失在阴暗森林中的但丁。

每个孩子都知道，夜晚是恐惧的开始。有谁不害怕黑暗呢？众神是光明的创造者，他们朝九晚五地工作。所以到了夜晚，我们就只能靠自己了。

※

20分钟里，我站在门前庭院中，看着猎户座的群星向西方移动了三根手指的宽度。云层增厚，疾驰向东。在掠过的云隙之间，我看到了那个巨人。就在那儿！腰带上不容错认的三颗星！踌躇地闪烁着，像西洋镜上的图画。在我父亲那本书的星图上，猎户座的形象呈现出全副武装的姿态，他手持木棒和狮子皮做的盾牌，利剑悬于腰间。但是，这充满想象力的图像与我在这个断续梦境中的夜晚所见到的星空不太一样。今夜，我见到的是已经失明的巨人，是让人怜悯的、英俊的巨人，是海神波塞冬的儿子。他迟疑地伸出手臂，踉跄着向西穿过一片黑浓如酒的大海。

在其他晴朗的时间里，星座中最明亮的那颗星被称为Lucida。而猎户星座中的一等星——位于巨人肩膀的参宿四，即为猎户座最亮之星。血红色的参宿四，就像是猎人被刺瞎的眼睛。这是一颗红超巨星，已经是恒星膨胀的强弩之末，它的直径约有6.5亿千米。如果参宿四处于我们太阳的位置，那么地球及其轨道都会位于参宿四体内，就连火星也逃不掉。参宿四是已膨胀到足以吞噬周围行星的老年恒星。

巨大的参宿四，是少数几颗天文学家可以成功拍摄到细节照片的恒星之一。在这些特殊的照片上，参宿四貌似明亮的圆盘，而不再只是一个小光点。圆盘周围缠绕着气态的冕层，它们是被星风吹离恒星表面的气体。我见过一幅用计算机处理过的参宿四的伪彩色照片，照片以不同的颜色表现出恒星表面的温度高低。这种方法可以展现恒星内部的对流结构。恒星核心的火炉将恒星外层巨大的能量激发，它们翻涌着掀起巨浪。照片中橘色的“海洋”标志着那是热量由恒星内部穿透到表面导致温度上升的区域，蓝色的“大陆”代表着那是能量沉降以至温度较低的地方。谁能想到这些呢？谁能想到那些夜空中冰凉如水的小光点，其实是另外的太阳，是燃烧着热核反应的创造之火的太阳？谁能想到猎户座肩头的红色恒星竟然能放射出比地球上正午艳阳更耀眼的光芒？

这些来自天文学家的信息，这些计算机处理过的明信片，最近才告诉我们，参宿四是遥远的巨大恒星，是氢和氦组成的直径6.5亿千米的火球，是剧烈膨胀的星体，肆无忌惮地吞噬着行星，点燃了银河系昏暗的角落。它的表面翻腾动荡，像风暴中汹涌的海水，火舌在幽暗的宇宙空间蔓延亿万千米。站在地球上看，这个庞然大物却只凝缩成天空中猎户座肩头的一个小亮点。夜空里的恒星善于隐藏各自真正的秉性，因为它们总是自如地玩弄着一个名为“距离”的诡计。如果在我们同参宿四之间的距离——500光年远——存在一颗像我们的太阳这样通常大小的恒星，那么它是无法被肉眼观测到的。参宿四周围的行星上要是也能有一座帕洛马山天文台的话，上面的天文学家如果足够幸运，就有可能在照相底片上从银河系的数十亿颗恒星中识别出我们细若微尘的太阳，可这样的工作无异于大海捞针，因为它是那样平凡无奇。参宿四能在我们自己的夜空中现身也完全是因为它令人难以置信的尺寸。

※

沉重的云层后面，猎户座渐渐西行。海神之子行走于水上。在阻隔视觉的黑暗中，他会不会先用一只脚小心翼翼地试探着迈进水中，以免跌入世界边缘的深渊？当巨人的脚掌羞怯地踏在鱼儿们头顶星光闪耀的海面上，它们会继续安然地潜游还是会四散逃走？“在黑暗的时光里，视线开始清晰。”这是诗人西奥多·罗特克[6]的名句。先知以赛亚也说过类似的话：“走进黑暗的人看见光。”中世纪的神秘主义者拥抱黑暗。信徒们相信，只有穿过黑夜，才能收获天主赐福的光明。

而我不奢求于赐福便会感到满足。就像一尾在幽暗海水中游动的鱼，隐蔽于行走在水面之上的巨人身影下已使我心满意足。科学之光，

比神秘主义的光明更加严谨。本书是一本关于科学的读物，是从暗弱的星光中用理性和想象力提炼出来的纵观宇宙的视野，是凝成露珠般的夜晚浓缩而成的新宇宙学。

科学之光可能比神秘主义的光明要严谨得多，但对英雄气概的追寻却一点儿也不少。新天文学的壮丽视野足以把众神从天上的宝座上踢开。就猎户座本身而言，在它之中就藏纳着足以匹敌奥林匹斯山的科学事实和未解之谜。恒星诞生于充满尘埃的星云之中，热核反应将它们燃起，爆发的强烈光芒足以致使附近的行星目盲。再比如，位于猎户座足部的参宿七，它燃着热切的蓝色光芒，仅仅百万年间就已消耗掉比一百个太阳还要多的物质。像参宿四这颗红超巨星一样浮肿的恒星，正努力延缓最终的引力坍缩。有些恒星起伏不定，深深地叹息；有些恒星不堪重负已经爆炸；有些恒星死去时会收缩到行星那么小，甚至收缩到只有一座城市的规模，然后——留下一块城市大小的永夜之地——它会继续缩小，把自身收缩成一个针尖，然后再缩，直到把相当于十几个太阳的质量压缩到超越物理尺寸为止。

猎户座腰带附近萦着一缕黑烟，那是马头星云。那里的空间足够容纳2000个太阳系。谁会愿意走进那样的黑暗森林呢？马头矗立在明亮的气体背景之前，周围全是氢元素辐射的玫瑰色的华丽波涛。谁能在那样的广袤无垠中认出自己的样子？无论是马头星云还是那明亮的气体背景，对于肉眼来说都是不可见的。据说，只有在特别黑暗、特别晴朗的条件下，利用搭配宽视场目镜的中等尺寸望远镜，才有可能观测到马头星云。我尝试过，但从来没能成功。我对这部分天空的了解，仅仅得益于众多大天文台拍摄的丰富多彩的照片。这个区域的丰富程度无与伦比：耀眼的恒星、黑暗的星云，以及被猎户座腰带上最东边那颗巨大的恒星参宿一的辐射激发的闪烁气体。如果夜空中有什么东西可以媲美神秘主义的幻想，那一定就是这里。

从星光中攫取宇宙的秘密已经不再只是千面英雄的工作，它现在属于拥有同一副面孔的一千位英雄——这就是我们的科学界。但探索就像是护送猎户座踉跄着穿过黑浓如酒的大海。“夜晚是我们无尽的窗口。”我们踉跄着穿过黑暗，向着光明前行。

奥利翁听到铁匠手中锤子的敲打声。他跟随着乐声穿过海洋，最后来到利姆诺斯岛——铁匠的熔炉。铁匠是赫菲斯托斯乔装打扮的，他是锻造之神、手艺精湛的匠人，是他为众神锻造了金色的太阳和银色的月亮。锻造之神同情盲眼奥利翁的遭遇，派遣自己的仆人刻达利翁作为他的向导，一起向东方行进。刻达利翁坐在盲眼巨人的肩膀上，带领他去寻找阿波罗和太阳将升的地方。奥利翁面朝东方而立，太阳升起。他感觉阳光温暖了自己的双眼。之后，他慢慢恢复了视觉。起初眼前迷蒙一片，之后雾气渐渐消散，他的世界终于再次清晰起来。

※

古希腊人相信，眼睛在视觉方面扮演着双重的角色。他们认为，从双眼中可以放射出一道苍白的光线，与世间万物接触后再返回瞳孔，所见事物就像是旅行者归来所携带的礼物。对他们来说，眼睛既是发射器又是接收器。现代科学已经推翻了古希腊人的视觉理论。现在我们已经知道，眼睛的作用只是被动地接收，它仅仅是容纳从四面八方而来的光线的收集器。视觉，用新的说法，意味着投向光明，仅此而已。

但是，除此之外，一定还有些东西，不仅仅是投向光明那么简单。是哪些因素影响着光？或者说，为什么我们在黑暗的时光里却能看得最清楚？几天前的一个下午，日光已渐渐消退，我在一片浸水草甸上意外地发现了一团紫茎泽兰。这种植物开着紫色的小花，像燃着紫色的烈焰。它的茎间挂着银色的蛛网，一只金蛛转动它布着黄色条纹的肚子，朝向正在西沉的太阳。它的颜色穿过草地，就像一枚发亮的螺栓。

“在黑暗的时光里，视线开始清晰。”这是一个悖论：黑就是白，黑暗是美丽之母，光的消亡就是展露。难道古希腊人终究是正确的吗？也许，只有在黑暗的时光里，智慧的光芒才能从眼睛里迸发出来，才能指引通向世界的正确方向而不被灼热的阳光所掩盖。也许，只有在黑暗的时光里，眼睛和思维才能彼此转化，才能精巧地合作，激发出视觉的艺术。没有多少人愿意走夜路，没有多少人愿意走进黑暗的森林去感受恐惧所带来的肠胃里的焦灼，也没有多少人愿意生活在漆黑的山洞度过一个又一个不眠之夜。但，令人意外地，古希腊人的真理浮现出来，思维之光带回了非凡的礼物。“一个人走向远方，寻找自我的意义。”西奥多·罗特克说。浸水草甸上的时间已过去一个小时。金蛛在纤细的蛛丝上转动着腹部的黄色条纹，像钟表的时针一样旋转着追踪太阳的方向。“渐昏渐暗的林荫里，我遇见自己的身影。”罗特克继续说，“日子在火中煎熬。万千契合宛若狂风暴雨，猛烈不知疲劳。群鸟飞舞，残月当空，天仍大亮，午夜却再次难逃。”[7]

3　微光

1982年3月10日，我在等待世界末日的到来。根据大众媒体所谓的确切报道，太阳系所有的行星在轨道上的位置会在那天与这颗恒星处于同一侧，就像穿在竹签子上的肉串一样排列成一条直线。有人预言，这种罕见现象的发生将会招致严重的后果：所有行星的引力联合起来拖曳牵引，作用在一条直线上，会引发太阳风暴，对地球造成巨大危害。而重创之下的地球，火山爆发，大陆板块巨震，地质断层像拉链一样被撕开，加利福尼亚沉入大海。

好吧，当然，这一切都没有发生。加利福尼亚还安稳地待在圣安德利亚斯断层上，太阳依旧孜孜不倦地散发着光芒，地球也还安逸地在原本的自转轴上旋转。

行星根本不会排成一条直线，至少不会像报纸上说的那样排列，不会像一根穿满珠子的看不见的线。在行星排成最接近直线的状态时，如果从太阳的视角看过去，会发现它们分布在一个95度张角的扇形区域中。这意味着，这些行星分布的范围已经超过了天空的四分之一。在预言中的灾难到来之前的好几个星期里，这些行星的排列角度已经与人们所担忧的情形非常接近，但没有引发任何值得在意的事件。不仅如此，历史上还有过比这一次排列得更加整齐的时候，也没有招致什么严重后果。更何况，天文学家可以精确计算出这种特殊的排列状态所增加的引力，它的作用对地球所产生的影响，还比不上有人从二层楼的窗户跳出去落到街上造成的冲击力大。

不过，行星齐聚在四分之一天空中的确是足够罕见的情况。像1982年那样排列的紧凑程度，每179年才有机会重现一次。如果你能赶在3月10日那个星期的某天太阳升起之前起床，那就有机会同时看到能以肉眼观测到的全部五颗行星。

预言中的灾难日，早上5点，我正在大学的天文台观测。天空仍漆黑如墨，群星闪烁。我把望远镜从西移向东，开始太阳系大巡游：火星、土星、木星、金星和水星。就连月亮也以优雅的月牙姿态装点了我的清晨，与群星一起参与了这场游行。土星，戴着俏皮的光环帽子，看起来就是卡通动画中常见的星球的原型，那么梦幻，却无可否认的真实。木星慷慨地展示出全部四颗大卫星供我观赏。金星也化成小月牙般的形状，似乎在调皮地模仿着月亮。小小的水星，和平时一样，身影总是让人难以捕捉。当时的它，静立在东方渐露霞光的微粉天空映衬下的树顶上。我爬上天文台圆顶，从天窗向外观赏日出。行星们以不同寻常的光辉对抗着逐渐明亮的天空。蓝色的角宿一和红色的心宿二也闪耀着

光芒加入群星的壮丽行列。仅这一个清晨，就足以让人觉得179年的等待是值得的。

※

1982年3月10日那天，世界没有走到尽头，天空却给我们带来一场足以铭记终生的微光盛宴。那天早上，没有地震打扰我的美梦，或是把我从天文台圆顶的天窗上晃下来；没有太阳喷吐出长蛇般的烈焰。只有夜空，轻声呢喃着甜言蜜语。在我生活的地方，隐藏在大城市的灯光和烟霾之下，夜空的低语几乎无法使人得以耳闻。我得把握住所有可能的机会。

在最暗的、最晴朗的夜晚，仅凭肉眼可以观测到几千颗星星。除了恒星之外，对于远离城市灯光的细心观测者来说，裸眼还可以看到其他奇景：星团、至少一个星系、星云、银河、黄道光。可是，典型的城市或郊区的观测者也许只看得见几百颗最亮的星星，此外再也见不到其他任何令人难忘的天体。我们辜负了黑夜，我们丢失了微光。

我目睹过黄道光——莪默·伽亚谟[8]所说的“伪曙光”。在8月或9月，晴朗无月的夜晚，黎明前一到两个小时，可以看到从地平线开始沿着黄道带延伸的黄道光。黄道光比银河还要暗弱，我曾试图探寻它好多次，但都没有成功。太阳系内部区域的行星之间遍布着尘埃，黄道光就来源于太阳光在星际尘埃中的反射。这些尘埃通常在太阳附近形成一个扁平的盘，而这正是我们只有在日出前或日落后，以及在一年中那些太阳系的平面相对于地平线剧烈倾斜的时刻才能看到黄道光的原因。我上一次看到的黄道光，是越过海边黑暗的山坡照射而来的。来自大西洋的风吹散云层，地平线上漫步的星笼罩在黄道光的华盖之下。我再也不曾见到这样的景象。

弗拉基米尔·纳博科夫在《文学讲稿》中这样建议他的学生：“让我们崇拜自己的脊椎和脊椎的兴奋吧。可以相当肯定地说，那背脊的微微震颤是人类发展纯艺术、纯科学的过程中，所达到的最高情感宣泄形式。”在夜空中找寻微光，既是一项艺术，也是一门科学。搜索的结果往往一无所获，但我把这样的兴奋视作极其珍贵的财富。“我们本来就是头部燃着圣火的脊椎动物。”纳博科夫说，“人脑只是脊柱的延续，是增强了的组织顶端，燃烧着纯净的蓝色火焰，但是贯穿整根蜡烛的是烛芯。”在看到黄道光的那个早上，我感受到整根烛芯燃烧的热量在我身上蔓延。

还有一种特殊的微光盛宴，试着数一数金牛座中的小恒星团——昴星团中的成员吧。自古以来，这些恒星就被称为“七姐妹”“七少女”或者“明亮七星”。早在公元前3世纪，已经有一首诗歌为它们取好了名字：阿尔库俄涅（Alcyone）、梅洛普（Merope）、塞拉伊诺（Celaeno）、塔宇革忒（Taygeta）、斯忒洛珀（Sterope）、厄勒克特拉（Electra）和迈亚（Maia），它们“微小而暗淡”。大部分现代观测者

只能用肉眼看见昴星团中的6颗恒星，或者，如果夜晚格外晴朗，那就能看到9颗或10颗。在望远镜发明之前，开普勒的导师梅斯特林，画出了这个星团的11颗恒星。天文学文献中也不难见到以裸眼观测到这个星团中12颗恒星的记录。我见过的最多的数字是声称自己看到了16颗。这个星团实际上可能包含多达500颗恒星，它们当中也许有20颗恒星的星等位于肉眼可见的范围内，但是过于密集的排布让观测到16颗的纪录显得很可疑。在最黑暗、最晴朗的夜晚，我的最佳成绩是看到9颗。那个时候我还年轻，视力比现在强多了。

或者，试试寻找年轻的月亮。严格来说，月亮在经过太阳和地球之间的那一刻，可以被称为新生。这一瞬间可能降临在白天或黑夜的任意一个时间节点。我们所称的“新月”，实际上是年轻的月亮，我们只能在月亮真正新生之后的某一刻才能察觉到天空中纤细的小月牙。最年轻的月亮，可以在日落之后被发现，那是低垂在西方的月牙，紧靠在太阳刚刚落下的地方，被地平线上炫目的落日余晖所净化。有许多因素——地理纬度、日落时间、月球轨道平面与地球轨道平面的夹角角度——共同决定了看到新月的可能性。天气的晴朗状况，地平线的清晰度，视力的敏锐程度，也都起到了重要的影响作用。我曾见到新生不超过30个小时的月亮，它薄如指甲，纤如睫毛，弯曲弧度像是丘比特的弓，弓弦上的箭直指太阳。但是30个小时算不上破纪录，甚至连接近纪录都谈不上。总是有人发表报告说见到了新生24小时的月亮。莉齐·金和内尔·柯林森是英格兰斯卡伯勒的两位女佣，有记录表明她们在1916年5月2日看到了新生14.5个小时的月亮。传说文艺复兴时期的天文学家约翰内斯·开普勒在某天早上看到了残月，又在同天晚上捕获到了新月，但这个故事很难让人相信。我会继续探寻。我会查看我的年历以及盖伊·奥特威尔每年编写的天文年鉴。我会等待那个特别的夜晚，等待所有必需的因素都恰到好处，地平线清晰分明，月亮从我肩头越过，比我以往见过的都要更加单薄瘦弱。我想那就是我心中最完美的优雅月影。

还有其他难得一见的天象奇观可以被肉眼捕捉到，它们化成微光在夜空中闪烁，隐藏着自己真正壮丽的一面。仙女星系就是一个很难，但确实可以凭裸眼观测的星体系统。在很多个黑暗的乡村夜晚，我都从夜空中分辨出过它。在发明望远镜之前，仙女星系只是星图上不甚清晰的小斑点。没有人想得到，这些模糊的光斑是包含万亿恒星的宇宙岛屿，是另一个银河系，是除了我们自己的星系以外唯一不借助光学辅助就可以目测到的星系。仙女星系距离我们200万光年远。如果没有望远镜的帮助，再也不会有比这更远的光能进入你的眼睛。

我曾有幸得以一瞥M13的真容，那是武仙座中包含百万恒星的球状星团，也或许，我只是想象自己真的见到了它的样子。未来某天，我将旅行到南方，去观测半人马座和杜鹃座中更明亮的球状星团。据说在最黑暗的夜晚，有可能看得到天鹅座中的北美星云。拥挤的恒星让这团星云弥漫出暗淡的粉色光芒，拢在天鹅的翅膀下方。我常常试着寻找它，但从没能达成所愿。我不会就此放弃，我会继续尝试。

我看到过鬼星团，或称它为巨蟹座的蜂巢星团。对肉眼而言，它只是一团朦胧一片的乳白色的光。喜帕恰斯称它为“小云”。当伽利略将他的望远镜转向这朵“云”时，他惊喜于竟能从中分辨出微小的金刚石般的恒星。他数出了36颗。这个星团里实际上有着几百颗恒星，闪烁着超越视觉极限的光芒。

※

我第一次观测到鬼星团是在卡茨基尔山的小山坡上。不知怎的，那一天我走到了约翰·巴勒斯的墓地。他是世纪之交的博物学家。当时有两位著名的博物学家名叫约翰，一位是约翰·缪尔（John Muir），即“约翰·大山”（John of the Mountains），就是在阿尔卑斯山峰和阿拉斯加冰盖上安家的那位；另一位就是约翰·巴勒斯，即“约翰·大鸟”（John of the Birds），他喜欢坐在自家门前的走廊上，看地球自转带来斗转星移。巴勒斯是大自然的细微光芒和轻声低语的鉴赏家。“优秀的自然观察者体现在细节处，”他说，“处处有痕迹，处处有意义。”或者，“能成功观察自然的秘诀，在于拥有发现暗示的能力。”巴勒斯是发现了暗示的人，他相信他脊椎的兴奋。

巴勒斯安眠在一片散布着岩石的草地的最高处，从那里看下去，宽阔山谷的壮丽景色尽收眼底。墓地周围环绕着本地页岩垒成的矮墙。附近有一泓山泉，泉眼之上有一块平坦的巨石，巴勒斯每日就是坐在那里从光阴中观察并获取自然的暗示与启示。一块固定在巨石上的牌匾镌刻着这位博物学家的墓志铭：我站在永恒的道路之中，属于我的将认得我的脸。

在春天的清晨登上那座小山丘，四下寂静安宁，只有风声摇曳着桦树噼啪作响。一只丘鹬被我从巨石下面惊起，尖叫着拍打翅膀，长长的鸟喙从地面掠过。我确信这里就是那样的地方，是那种能从一百万种不起眼的特征和细碎的真理之光中培育出一个哲学家的地方。植被覆盖的山坳里，宁静的草甸一直延伸到清澈的小河边。那里还处于冬日的冰封状态，易碎般脆弱，积雪的河岸绵延到干石墙北侧。约翰·巴勒斯墓地周围的土地上张贴着布告，宣告着这里属于“纽约大峡谷的C.巴勒斯”。依托着C.巴勒斯的善意，以及对“属于我的”一切的探求，我无视了那布告，徒步踏进那片原野。艳阳高照，鹰击长空，它在等待狙击那些度过了漫长冬眠，禁不住暖阳诱惑冒头而出的小动物。浑身是毛的毛毛虫自信地穿过草甸，打算搜寻一处合适的地方，好把细胞重新排列，让自己蜕变成春天的第一只飞蛾。我用两双眼睛看着眼前的一切——我自己的双眼和约翰·巴勒斯的双眼。我记得巴勒斯的信条：“了解只是一半，而爱是另一半。”

那天深夜，在山坡上，我扫视微光闪烁的群星，发现了巨蟹座的鬼星团。我想起巴勒斯，这位洞察自然界微妙姿态的大师。对于白日，巴勒斯是坦诚的生物，但对于夜晚，他却只懂得赞美。“夜晚的恩赐并非有形的，”他这么说，“夜晚不会伴随着水果、鲜花、面包和肉类而来；夜

晚的降临伴随着群星和星尘，伴随着神秘和涅槃。”从此之后，夜晚的微光对巴勒斯袒露出自己的秘密，天堂的大门为他开启。他的思想，“像一道闪电”，击中无底深渊，随后天空的面纱再次剥落下来。幸好，对深夜赐予的这种模棱两可又转瞬即逝的启示，他说：“如果世界永远以一种赤裸裸的宏伟姿态出现，也许会超出我们的承受能力。”

在卡茨基尔的墓地的那一天，我注意到从记号石下方生长出来的新的藤蔓植物。幼嫩的卷须盘绕着穿过干石墙上的孔洞，绿色的嫩芽沿着古老的无尽道路奋力迎向太阳。春天的风裹挟着细碎的暗示，夏日的踪迹就藏在空气里。在这样的日子里，就连卡茨基尔页岩的重量，也不足以将老人的精神压在地下。

4　夜行动物

谁会在夜晚出门闲逛？是萤火虫，拖曳着萤光的长尾；是北美夜鹰与杜鹃，在黑夜中孤芳自赏；是牛蛙与蟋蟀，一唱一和地唱着走音的歌。猫头鹰和飞蛾也在夜晚外出，它们两个中的一个只不过是另一个的放大版。刺猬也走出来，群星好似披挂在它们的尖刺上。丘鹬，举止轻佻地转着圈。还有鼻涕虫和蜗牛在它们行进的路线上留下一串亮闪闪的黏液。漆黑如墨的夜晚，鬼怪也四处横行。魑魅魍魉不安好心。狼人褪去伪装化为原形。吸血鬼隐匿身形，悄无声息地填饱肚子。圣艾尔摩之火击中航船的桅杆，女妖伸长手臂向你召唤。诗人同样喜欢在夜晚外出漫步，他们说：“这是理智、寒冷与行星的光。心灵的树木却是黑色的。”[9]当然不能落下天文学家。太阳落下的时候，天文学家就像阴影或一只獾那样钻回自己的地盘。

今晚，我漫步在西爱尔兰一座高山的黢黑小路上。北斗七星在东北方的天空中光芒四溢。这七颗明亮的星，像七位哲人、七位智者、七头熊或是七头公牛。它们是向昴星团七姐妹求爱的七兄弟，却偷偷带走了其中一个姑娘（看！在开阳星身边的就是那个失踪的妹妹）。我曾一度惊讶于不了解星座的人也总能轻松地辨别出大勺子似的北斗七星。我一直好奇，这些星星的模式是否会以遗传学的方式在人类的大脑中留下深刻的印记，就像鸟类天生有能力识别并跟随星座的轨迹来为自己的迁徙引航。北方的天空再也没有别的星座图案像北斗七星这样留存着悠久丰富的历史文化。北斗星存纳着人类的忧思和梦境。

北斗星在英语中的正式名称叫作Ursa Major，以中文来讲即为大熊座。不光是西方传统把这个星座看作一头熊，北美的印第安人对此也有同样的理解。仅靠北斗的七颗星要认出一头熊的形象是很难的。一些制图家试图借助周围相对暗淡的九到十颗星来勾勒出令人满意的熊的形象。对我来说，这几乎是不可能做到的。北斗星中的七颗明星比这个星座中的其他恒星都耀眼得多。北斗星中的恒星，就如同全宇宙中其他的恒星一样，缓慢地改变着它们在天球上的位置，天文学家将其称为自行。对历史上的很多人来说，构成勺子图案的这七颗星也许曾有某刻看起来比今天的样子更像是一头熊。但是，利用现在自行的轨迹来推算它们曾经的位置并不难（我自己就计算过很多不同时期的北斗七星的位置），可在人类历史跨度内的任何时期——至少在我看来——北斗七星都不会让人觉得像一头大熊。话说回来，还有一个滑稽的小情况可供考虑：也许在这个星座得到大熊座之名的那个历史时期，所有的熊看起来都长得更像是勺子。

中国古人把北斗七星看作不朽的天上仙宫；对爱尔兰人来说，它们

又组成了大卫王的华丽战车；在斯堪的纳维亚，北欧人说那是诸神的雄伟马车；日耳曼部落又把它看作雷神索尔的战车；中世纪的基督徒把北斗七星看作先知以利亚升天的天堂战车；而在英格兰传统中，北斗星被认为是查尔斯的马车或是一柄巨大的犁。

谁会屈从北斗的光辉？谁会放弃甜美的梦乡而去追寻巨熊那永恒的巢穴？梭罗的一位同伴曾宣称，人在没有星星的情况下也可以生存得很好，但那种生活却是大打折扣的。他说星星是一种永不会被舍弃的必需品。群星是每日的食物，是圣餐，是护身符和誓约。如果没有星星，诗人会做什么呢？如果群星“如石头般重重坠入纤纤的树丛”，他们会做什么呢？

在夏季的午夜，经历极昼的因纽特人要等上好几个星期才能看得见大熊座。可其实那头大熊就匿身于极昼的日光里，绕着天顶悠闲地转着圈。

※

每位诗人，每只狐狸或獾，每只蛾子或猫头鹰，所有凝望过夜空的生物都进行过天文学历史上最重要的观测之一。他们得出结论：夜空是黑暗的！群星在黑色的天空中闪烁。北斗七星就像一柄巨大的犁，在北极的漆黑上空刨出沟壑。夜空的黑暗远比群星能向我们讲述更多关于遥远宇宙深处的故事。黑夜是一个悖论，充满着深刻的意义，让我来解释给你看。

1610年，约翰内斯·开普勒收到伽利略的新书《星际信使》的副本。这本书概述了伽利略这位意大利科学家用望远镜观测到的天空的景象。开普勒反对伽利略关于宇宙无限以及宇宙包含无穷多恒星的观点。他在给伽利略的信中这样写道：“如果真是这样的话，整片天空都会像太阳一样燃着炫目的光芒，而在无限的宇宙里，无论朝哪个方向看，我们的视线都必然会抵达一颗星，就像身处密林之中的人，周围每个方向都围挡着树，那他的视线一定会停留在一棵树干上。很显然，夜空不像白天那么亮，所以（开普勒推断）宇宙不可能是无限的。”

百年之后，英国天文学家爱德蒙·哈雷提出，如果星光的传播因距离过于遥远而减弱，不能被我们探测到，开普勒的观点就站不住脚了。但是哈雷的反驳理由并不充分。正如他所认为的那样，任何来源的光的强度，都与其光源到观测者的距离的平方成反比，但是在无限宇宙中的空间体积在每个方向上也随着距离的延伸而增加，并与距离的平方成正比。如果恒星在宇宙空间中均匀地分布，那么发光恒星的数量也必将随着距离的平方成正比增加。这恰好生成两个可以完全抵消的效果：随着与光源之间的距离加大，光的强度逐渐削弱，但是发光体的数量却逐渐增加。所以开普勒显然是对的，在无限的宇宙里，夜空就应该如同白天一样明亮，北斗七星的光芒应该被淹没在宇宙群星的绚丽华彩中。开普勒的观点在1826年被海因里希·奥伯斯[10]重新提出，后来这成为著名的

奥伯斯佯谬：如果宇宙无限，并且均匀地布满发光的恒星，就不应该存在夜晚。之后，有不少人试图解释这个问题。一些科学家抗辩说，星际空间中存在着气体和尘埃，它们吸收掉星光，因此减弱了遥远恒星的光芒。但是我们可以证明，如果星际气体和尘埃吸收了星光，它们最终会变得过热而辐射出同等的能量，照样可以维持天空的亮度。何况恒星的分布并不是均匀的，而是结合成星系这样的团块。但是这个发现也没能解决奥伯斯佯谬。如果把宇宙中的星系看作星系中的恒星，这个佯谬同样存在。

但如果宇宙不是无限大呢？这样这个佯谬就迎刃而解了。或者宇宙太年轻，遥远的星光还没有足够的时间抵达我们身边，如此佯谬也能得以解决。夜空是黑暗的，这是毋庸置疑的事实，而这一点似乎能让我们得出结论：宇宙不是无限大的，或者根本没有我们想象得那么老。无论是哪一个结论，都深刻地影响了前几个世纪的天文学家们。一个有限的宇宙简直让人难以想象，宇宙的边缘之外是什么？一个有起始的宇宙似乎违背了物理定律——是什么将宇宙从无到有创造出来——也许那真要求助于神的特别干预。19世纪的科学，因趋向理性的思想转变，无法承认宇宙具有边缘或是起点。天文学家深深陷入名为夜空的黑暗困境里。

※

“看，看那群星！看那头顶的天空！”杰拉尔德·曼利·霍普金斯吟诵道，“哦！看看坐在火光里的天上的人们！看那明亮的街区，看那颤动的城堡！夜空的钻石掉落在幽暗的树林，那是精灵的眼！”[11]天上有超过人类心脏可承受限度的奇观。我漫步在高山间一条黑暗的小路上，北斗七星闪耀着，像电焊机发出的光芒。它们围绕着北极星旋转，好似一团轮转烟火，时而沉向地平线，时而跃回无垠苍穹。首先来认识一下黄色的恒星天枢（Dubhe），它的名字由阿拉伯语 Thahr al Dubb al Akbar 而来，意为“大熊之背”。然后是天璇星（Merak），即“熊的腰部”。天枢和天璇这两颗星的连线组成天上巨大的表针，它们始终围绕着北极星转动，就像拴着安全绳的婴儿。接下来是北斗的第三颗恒星天玑（Phad），也就是“熊的大腿”，以及第四颗恒星天权（Megrez）——“尾巴根部”。没那么闪耀的天权星，是勺把和勺斗相连的地方，从这里再往外看则属于勺柄的部分：首先是玉衡（Alioth）；然后是开阳（Mizar），它身边总是带着一颗暗弱的名叫“辅”的伴星（这就是昴星团中那个被掠走的小妹！）；最后是摇光（Alkaid）。宙斯“将它们掷向天空，它们乘着旋风旋上高空，固定在那里”。最高天神宙斯贪恋凡人卡利斯托。美丽的卡利斯托原本是在山间漫步的女猎人，以在阿卡迪亚山中追寻凶猛野兽为乐趣。宙斯的妻子赫拉因嫉妒她丈夫对卡利斯托的痴迷，憎恨他的不忠，就把不幸的卡利斯托变成了一头熊。作为一头熊，卡利斯托只能蜷缩在森林中，惧怕人类也惧怕野兽。有一天，卡利斯托的儿子阿卡斯在森林中偶然遇见她。高兴坏了的卡利斯托忘乎所以，用两条后腿站立起来想要拥抱她的儿子！面对突然袭来的大熊，阿卡斯吓了一跳，立刻搭弓上箭。千钧一发之际，宙斯从奥林匹斯山上遥望到了

下面发生的一切。看到悲剧即将上演，他果断施展魔法，将阿卡斯变成了一头小熊。而后，宙斯把母子二人一起升到高空，让他们永远以两头熊的形象留驻在那里，成为如今的大熊星座和小熊星座。

我曾一度搜寻大熊座附近空间中的星系。用一架中等尺寸的望远镜，我能发现那个星座中距我们最近也是最明亮的两个星系。1774年，德国柏林的天文学家波德首先发现了M81和M82星系，它们是夜空中两个不易辨别的团块。1781年，“彗星捕手”梅西耶把它们加入自己的星表，分别编上了序号，再在前面加上自己名字的首字母M。如今我们称呼它们的名字，即为当时梅西耶赋予它们的编号。相较于M82，M81是更灿烂的天体。在天文台的照相底片上，可以把它分辨为由2000亿个太阳组成的耀眼风车，但是在业余爱好者的小望远镜里它就只能表现为雾状的模糊斑点。假如M81处在北斗七星的距离上，那么它可怕的光芒会充斥我们的天空。它将转动着、闪耀着，那光芒像无数个太阳堆积，灌满瞳孔，无可逃避。它的姐妹星系M82呈现出细长的纺锤形，神秘莫测，难以捉摸，看起来似乎因经历了暴虐的痉挛而样子古怪。它的恒星排列毫无规律可循，质量肆意变动。M82的核心遭受了相当于百万倍太阳质量的剧烈爆炸所造成的能量冲击而破碎不堪，恒星如同正在甩干身体的狗身上的水滴一样四处飞溅。它们周围的行星，无论是绿色的世界还是蓝色的世界，都因巨大的震撼被吹散了。“宽恕我们吧，上帝！请息怒。”M82就像阿卡斯的离弦之箭，射中母亲的心脏。

大熊座的七颗亮星中，有五颗真的属于同一个星团，距离我们大约80光年。天枢比这个星团更远，距离我们105光年。蓝白色的巨星摇光比其他几颗都要更远，距离我们210光年。北斗七星都属于我们的银河系，而且距离相对来说都不算远。M81和M82距离我们700万光年，它们是银河系之外遥远孤独的“宇宙岛”，悬在茫茫虚空的汪洋大海中。以地球上的时间计算，击碎M82核心的爆炸发生于850万年前，考虑到距离，在我们现在观测到这个星系时，那场爆炸刚刚过去150万年。在那场灾难的冲击波里，我从这座高山启程，我从这幕黑夜启程。“看，看那群星！看那头顶的天空！”跨越光年，星系在黑暗的天空中燃烧，这是思想之光。

※

奥伯斯佯谬直到20世纪才得到解决，而且这答案完全出乎意料。在1912年到1928年之间，天文学家维斯托·斯里弗尔成功地获取了40个星系的光谱。当时，人们还不知道所谓的“旋涡星云”就是和银河系一样的遥远的恒星系统。斯里弗尔让星系的光穿过棱镜，然后观察它们彩虹般的色散。星系发出的光是典型的恒星光，但是光的波长会有轻微的延长，朝着光谱上红色一端位移。星系光的红移暗示斯里弗尔，星系正朝着远离我们的方向运动，这就是所谓的多普勒效应，而当卡车在高速公路上疾驰而过的时候，它的咆哮听上去也会有同样的效果。当卡车接近我们的时候，声音波长被压缩，音调升高；而当卡车远去，声波被拉开，音调降低。这原理也同样适用于光波：光源朝着我们的方向运动，

光波压缩，向着光谱上蓝色的一端或者短波的方向位移；光源远去的时候，光波拉长，发生红移。M81正在以每秒77千米的速度急速远离我们而去，而M82远去的速度更是让我们追赶不及，达到了每秒386千米。

起初，这样的结论可能让人觉得有点奇怪。星系飞离我们，难道是因为我们对周围的天体没有吸引力吗？难道我们正处于被宇宙排斥的中心吗？答案非常显而易见，而且很快就明朗了。就在斯里弗尔获得星系光谱的同时，威尔逊山天文台的埃德温·哈勃和米尔顿·赫马森成功地测量出了星系间的距离。他们发现了人们未曾预料到的联系：星系不仅仅是远离我们，其远离的速度还和与我们之间的距离成正比。这关系非常精确，以至于我们可以推测，宇宙中的所有地方都在均匀地向外扩张。星系似乎正在彼此散开，空间正在膨胀。我们的银河系不是宇宙排斥的中心，每一个其他星系上的居民都会看到他们的邻居正在远离自己而去。如果星系正在彼此远离，根据它们的相对速度和现在的距离，不难计算出140亿年前它们一定靠在一起。星系的扩散始于宇宙的大爆炸。那是最早的初生之火。那是真正的创世大爆炸。

于是，我们可以解决奥伯斯佯谬这个遗留问题了：夜晚是黑暗的，原因在于宇宙正在膨胀。宇宙或许有限，或许无限。但是，无论怎样，宇宙经历的时间是有限的。它的开端就在140亿年以前。因此，我们没有办法接收到140亿光年之外的恒星散发的星光[12]，因为根本没有这样的星体存在。进一步说，后退中的光源减弱了亮度，如果遥远的星系还在远离我们，它们就不会像奥伯斯佯谬中所提到的那样应该对我们的夜空贡献出一份光明了。宇宙太年轻，还不足以让我们的夜空处处光亮。



我们的生活被黑暗环绕。“如果夜晚不用露水和黑暗修复这溃败的世界，那日子会是多么令人难以忍受！”梭罗写道，“当阴影开始聚集……我们偷偷地前行……就像丛林中的动物，寻找沉默又忧郁的思想，那是才智的天然猎物。”夜空，是神秘主义者、哲学家、科学家和神学家狩猎的乐园。我沿着山脊走上一条黑暗的小路，独自前行一个小时。大熊在东方的天空中循着路径移动了六分之一。小熊正围绕着北极星摆动尾巴。宙斯迷恋卡利斯托。卡利斯托放下她的箭袋。赫拉因为嫉妒而设计陷害卡利斯托。卡利斯托爱着阿卡斯。阿卡斯害怕大熊，箭矢搭在弓弦上正要射出。

“今夜，在无尽微茫的星光之下，树和花朵飘散着清冽的芬芳。”这是我第三次在这个冥思之夜想起西尔维娅·普拉斯的诗。每天都是生活的片段，每个人的生活都围绕着一些淡淡的黑暗。星系从我们身边跑开，稀释了它们的光辉，让夜空暗淡下来。夜晚是宇宙年轻时的样子。我走过的道路两侧都有用篱笆围起的，由黑莓、忍冬和灯笼花组成的树篱。从灯笼花的小灯罩里发出灰暗的微光，花哨的暗紫色和猩红色褪去，随着离去的星系一起飞远了。宇宙太年轻了，我走进它青春的光芒。现在有时间了，“树木有时会触碰我一下，花儿有的是时间陪着我”[13]。

5　万物之初

“春天慢吞吞地走来。”诗人这样唱道。可这天早上，春天就这样来临了。它躺在冬天里被压展得平平的草地上，藏在被仍在沉眠的动物掘得深深的却最终被遗弃的草间地洞里。春天悄悄地躲进借来的巢穴中。这是4月的第一天，草地鹨也回来了！

我没有看见它。4月之前很少能看见草地鹨，除非你能靠得足够近，把它从藏身之地吓出来才行。但是，它那长长的、含混不清的、双音节的鸣叫声，像番红花的盛开，稍微有些为时过早。在一两个月之内，草地会再次翠绿繁茂，但今天，春天的迷思沾染了些许悲叹的意味，就像草地鹨的歌声那样不够舒展。

草地鹨的叫声没有什么过错，我也能吹出这样曲调的口哨。但我该如何描述这声音呢？就像从跳板向冰水里跳跃？就像4月的风击碎玻璃窗？不，怎么说都不够确切。我翻阅我的鸟类相关图书，《黄金野外指南》提供了非常科学的“声谱图”来展现频率与时间之间的关系。我在图表上查阅到这曲调，大约持续2秒钟，音域位于中央C之上三到四个八度。可是这样的内容根本没用。《彼得森指南》上的内容略好一些：“两声清脆的、含混的哨声，悦耳而悠长。”“嘀呀——嘀咿呀——”彼得森尝试用尽量客观的感受描述鸟鸣声，这让我们更接近原本的声音，而不是奇怪的、悲伤的音乐。

通常情况下，人们总能从一本旧指南书中得到更接近现实的答案。查普曼的经典之作《鸟类手册》出版于1895年，其中记录了这样的文字：“草地鹨的歌声清脆而悲伤，是一种不同寻常的甜美哨音。”啊，这个描述更好了——甜美而悲伤。但在我们这个例子中，有关鸟叫声的一切，都没有比F.斯凯勒·马修所著的那本已有75年历史的《野生鸟类及其啼声手册》中表达得更好的了。“这支歌，”马修说，“如果不说它是伤感的，那毋庸置疑，它只能是悲凄的。”马修用他独具特色的夸张表达，把草地鹨的叫声描述为歌剧《茶花女》中男主人公阿尔芒所演唱的前两小节剧目，但其演唱方式更像是薇奥莉塔发现自己必须放弃阿尔芒时的唱腔。甜美又悲伤。草地鹨的歌声，就是春天！

为什么开始总是伴随着悲伤？婴儿的降生，新年的伊始，贝多芬交响乐第一声胜利的音符，正在复苏的草地上一只野鸟的叫声——所有这些约定的、欢愉的时刻，都沾染上了一种奇怪的、甜美的忧郁。草地鹨知道什么我还不知道的吗？这位身着黑金相间法衣的侍僧也有着自己的秘密。在皱巴巴的草地上的藏身之处，它正做着关于存在主义哲学的讲授，发表着玫瑰与荆棘的论述。它满怀希望地宣布春天来临，声音中又

带着丝丝忧伤。就像光明伴随着阴影，才开始便预示着收场。

※

来自地中海先民们的创世神话，后来被查理斯·多利亚和哈里斯·莱诺维茨翻译成了英语。神话中，上帝创造万物，伴随着七次大笑：哈哈哈哈哈哈哈。上帝能理解草地鹨的内心吗？他发出第一声笑的时候是不是眨了眨眼？那全是玩笑吗？还是一个恶作剧？今天是愚人节，完美的春日起点，完美的创世之日。

多利亚和莱诺维茨这样描绘上帝的第一声大笑：光芒（闪耀），显身，万物崩裂，宇宙之神，火神。这部神话有2000年的历史，只能从古文中翻译个大概，很难从中发现关于现代科学宇宙诞生理论的蛛丝马迹。“宇宙大爆炸”，天文学家弗雷德·霍伊尔就是这样轻描淡写地称呼宇宙的诞生的。也许“大闪电”是个更好的名字，或者“大劈裂”也不错。140亿年以前，一切都不存在。后来上帝笑了。无限致密、无限高温的能量种子，从虚空中涌现出来，向着无边的空间中扩散，最终漂流蜕变成物质。根据当下的宇宙学思想，这创世的第一声笑，只持续了十亿分之一的十亿分之一的十亿分之一秒。笑声结束，宇宙开始如闸门中涌出的奔腾洪水般不肯停歇地运转下去。

基本粒子物理学家和宇宙学家围坐在一起，用方程式、铅笔还有黄色便利贴，重新建立起关于宇宙诞生的最初瞬间的理论。这是宇宙尺度的野心，值得我们认真对待。他们是探测到夸克和类星体的人，是把物质转变成能量的人，是描绘出百万分之一的百万分之一秒的粒子运动轨迹的人，是寻找着比玻璃上的指甲刮痕更微弱的蛛丝马迹的人。这样的人如果提出这样的问题是很自然的：宇宙从何时、何处诞生？如何诞生？找到这些问题的答案，从数学上说，就像是把物质往反方向推导，就像是反转一个星系的演化，就像是把牙膏塞回软管里。

对宇宙起源的推测，源于对星系的后退的发现。也就是说，宇宙正在膨胀！空间就像是正在被吹大的气球，或者是平底锅上胀起的面包。当空间膨胀的时候，星系就会如同浑圆气球上涂绘的斑点，或是面包上点缀的葡萄干，彼此之间的距离越来越远。有趣的是，爱因斯坦早在20世纪初就预言了宇宙这种奇怪的行为，并将其以广义相对论的方程形式表达出来。这些方程看起来坚信宇宙就像正在发酵膨胀的面团。这结果太古怪、太出人意料了，爱因斯坦拒绝接受。因此，他给方程式增加了一项完全没有必要的常数，想要避免再得出那样的结果，当然，在这个过程中掺杂了数学的简单优雅。后来当埃德温·哈勃宣布宇宙的确正在膨胀的时候，爱因斯坦立刻冲到威尔逊山天文台借用哈勃的望远镜观探星空。据说当时在山上，有人对爱因斯坦的妻子艾尔莎解释说，这台100英寸（254厘米）口径的巨型望远镜是用来确定宇宙的结构的。“好吧，好吧，”艾尔莎回应道，“这件事我丈夫在一个旧信封的背面就做到了。”在威尔逊山天文台上看到的东西给爱因斯坦留下了深刻印象，最终他从自己的方程中去掉了那个突兀的常数项。他说，这个常数是他这一

生中所犯的最大的错误。

如果星系正在四散飞远，那么它们曾经一定靠得很近。如果我们倒过来播放这部电影，就会看到星系从四面八方聚合，彼此加速靠拢。它们会腾出无尽的虚空，挤碎所有的恒星，就像用手攥住一把潮湿的沙子。星星挤压着星星，物质碰撞着物质，宇宙的密度大得吓人。电影会在一片纯净能量爆发出的令人目眩的剧烈光芒中结尾。无尽，非凡，初生的宇宙之神，火神，这就是万物之初。

根据众所周知的物理学定律，现代宇宙学家可以轻松推算出宇宙在不同历史阶段的每个瞬间的状态。利用这些计算，我们现在还可以把这部电影再倒回来。宇宙诞生于140亿年前的剧烈光芒，那来自无限致密的纯粹能量之种，是原初的创世火球。这种子不单存在于某一个地方，它无所不在。虚空在宇宙开始膨胀之时自我创生。就在百万兆分之一的百万兆分之一的百万兆分之一的千万分之一秒之后，基本粒子——这里指夸克和电子——闪现跳跃在辐射背景中，破损重组，破损再重组，形成宇宙创生之初的原始材料，造物的过程挣扎着开始了。

造物之初的百万分之一秒之后，夸克跳起三人之舞，质子和中子出现了。又过了千分之一秒，质子和中子开始彼此黏合，成为轻元素的原子核。物质和反物质彼此湮灭，在自我毁灭的狂乱中纵情狂欢。只有中微子的洪流涌向未来。

时光飞逝，宇宙冷却，原子形成。之后星系也出现了，再之后是恒星。类星体就像明亮的灯塔闪耀在星系的核心。空间继续膨胀。上帝发出第一声“哈”的几十亿年之后，宇宙开始看起来有点像我们现在看到的样子了，尽管这时距离太阳系从银河系遍布尘埃的凌乱角落里形成还有80亿年。那个时候，造物主刚刚发出他的第五声笑（据多利亚和莱诺维茨翻译的神话所言）。甜美而忧伤的歌声再度响起，造物才刚开始，冬季已在角落潜藏。

※

不久以前，物理学家和天文学家绝望于永远也不能探知在宇宙诞生之前到底发生了什么。在宇宙历史上那个特殊的时刻，他们的方程式就像冲天火箭一样无限发散。宇宙的密度和温度的数值无限地增加，成为数学上不可攀登甚至难以观望的高山。空间和时间坍缩在一个无限小的奇点中，数字如同越缩越窄、越来越深的无底洞般持续减小，直到对它的计算方法成为一根太长太细、难以追寻的丝线。这就像我所居住的小城中的一条街。当地历史学家说，这条街拆掉路面就变回了曾经的泥泞道路，再往前追溯就是一条小径，再之前这里只有攀爬上树的松鼠的痕迹。以数学方式追踪宇宙到万物之初，就像是沿着这条街追寻，最终发现自己除了爬上了那棵树之外无路可走。是什么造成了大爆炸？这个问题如果不是毫无意义的话，就一定非常棘手。宇宙创生是无中生有，这似乎违背了物质和能量的守恒定律。但是，物理学家也只能耸耸肩说，

事实就是那样，然后就再也没办法解释更多了。当然，对造物主而言，那就如同一声轻笑或是一天的工作那样容易理解。

后来，新一代的年轻宇宙学家在推测万物之初的时候，变得越发地大胆，并得以从他们的方程式中瞥见宇宙诞生之前的世界。他们借助了最近的有关物质在高温环境下的行为的发现。他们调整了关于空间和时间的理论，引导我们重新了解夸克和中微子、难以捉摸的W和Z_0粒子，以及其他组成宇宙模块的亚原子基本粒子。所有这些知识给我们带来了一个惊人的预测：我们的宇宙，这个诞生于140亿年前的能量和物质辐射所形成的火球中的宇宙，也许只是众多宇宙的其中之一。宇宙可能就像更大的超空间与超时间基质中的泡沫一样沸腾，它随着超空间中的量子扰动而爆发。恒星和星系的正能量，与引力势能的负能量相互平衡，造物的所有泡泡相加却等于零。我们的宇宙是从虚无中爆发而不违反物理定律的泡沫，是包裹着我们的空间、我们的时间、我们的银河和它无穷无尽的星系兄弟的泡沫。如果做出这些计算的“魔术师”所言不虚，那么这些宇宙存在于全部的时间中，而我们群星闪耀的夜空只不过是一颗还在不断自我创造的星系泡沫的内部。

如果这些内容让你觉得头晕目眩，那我要恭喜你了。烧脑，是所有伟大科学的基本要求。在哥白尼发现地球只是众多行星之一的时候，在牛顿告诉我们太阳只是一颗恒星的时候，在哈勃证明了旋涡星云就是另一个银河系的时候，他们的大脑也会因剧烈运作而眩晕。《天空和望远镜》杂志的高级编辑艾伦·麦克罗伯特写道：“无论自然的属性是什么，在我们耐心调查之前，我们所见的都不如还未曾发现的景象更丰富。我们发现，自然从来不吝惜它的广博与丰饶。”上帝的“哈哈哈”并非低声窃笑，他在毫不遮掩地捧腹大笑。



如果草地鹨甜美又忧伤的歌声将我们的思绪引回创世之初，引回宇宙那个甜美又忧伤的季节的开端，那么红翼鸫的刺耳呼唤就是超级空间中隐藏的声音，虚无空灵，随意起伏，超越了万物初始的时空界限。在我新英格兰的居所附近，红翼鸫是最先到来的鸟类。它们早就来了，在春天之前，在讨厌的卷心菜之前，在柔弱的柳树之前，在卷曲的蕨类植物之前，在草地鹨之前。而今年，红翼鸫比往年来得还要早。2月的第二个星期，它们就出现在了我家附近。我听到它们站在水塘边高高的橡树上大声聒噪，假装善于交际。很快，它们会沿着溪流找到更矮小的树木，用刺耳的叫声互相防范，保护各自的水源不被侵犯。乌鸦活跃起来了！整个漫长的冬天里，乌鸦都占据着自己的栖身之地。现在，它们呱呱喧嚷着、盘旋着、抗议着突然到来的红翼鸫的侵占。专横的红翼鸫，栖息在它们各自的树梢上，完全忽视了乌鸦的不满。

红翼鸫是一种冷漠的、傲慢的鸟类，身上唯一的光彩之处就是它的双翼的颜色。它的嘶鸣声尖锐得可以锯断木头。它的红翼是它在旷野中的声音，披挂着骆驼的毛发，啄食着蝗虫与蜂蜜。我们原谅它的一切。

我们原谅它，因为它是万物之初的开始，它是一切之前的开始。它最先到达，有时赶在冬天风雪退去之前，有时赶在春天甜美而忧伤的气息之前。从它的嘴里，泡沫状的宇宙开始诞生，超越甜美，超越忧伤，超越物理学家的方程式的跌宕起伏。这就是万物之初。在上帝发出第七声笑的时候（我仍然跟着多利亚和莱诺维茨笑）——他看了看这一切，像只鸟一样飞去了。

6　古老的光辉

起初……地是空虚混沌的。神说，要有光，就有了光。

在创世的最初，亚原子的粒子对抗着背景辐射，闪烁不定。宇宙是煮沸的物质和能量的火球。宇宙诞生1秒钟之后，温度下降到100亿摄氏度，物质的创造停止了。质子、电子和中子，在光的海洋中舞蹈，直到宇宙盈满了炫目的辐射。

100万年过去了，宇宙冷却到可以使带电粒子抵抗辐射能量的压力，抵抗大分裂。电子连接原子核，形成了原子。宇宙中的烈性酒诞生了，主要是以氢和氦的形式存在。这些原子很轻，可以肯定，气球用它们装满就可以飘上天。但是现在，宇宙已经打下了基础，具备了建造世界的原子物质。光的统治减弱了，宇宙开始变得透明。但是，我们还要用一个章节描述一种古老的光辉。在接下来的10亿年中的某个时刻，星系开始形成，再用不了多久，类星体就会出现。

※

我今天在邮箱里收到一位朋友从报纸上摘抄的一首诗。这首诗描写了牧师带来的天主教教育可能产生的影响。诗歌的结尾有几行乔伊斯式的句子："他们用恐惧和强迫，冲洗了我们灵魂深处的罪恶，上帝的神圣珩鸟，哭泣着飞入高原的雨中，那里是仅存的圣地。"朋友随诗附上了一张字条，上面问我："你的珩鸟是不是也发生了什么事？"我不知道我的珩鸟发生了什么事，但它肯定已经冲破了牢笼。

大部分珩鸟都是生活在岸边的鹬鸟类，但是高原珩鸟并非如此。它们在高海拔的荒原和沼泽上安家，在山坡的旷野和坑洼的草甸上筑巢。它们的声音像是风的呼哨声，即使在夜晚也清晰可闻。这是一种害羞的鸟。它有着干草的颜色。不经意间，会听到它强烈的、空气中的柔软泡泡般的鸣叫。我的一本鸟类手册上说："在它们迁徙期间，人们会清晰地听到，这些长途跋涉超越人类视觉极限的鸟类歌唱时的甜美音调。"如果诗人想要寻找逃亡的上帝的象征，没有什么是比高原珩鸟更好的选择了。

我说不清自己青年时代的上帝何时逃进了高原的雨季。他不受我的灵魂驱动。他的逃离也不是我的老师们的过错。在我大学毕业前，我曾真切地感受到上帝的面容离我很近，那是一段充满信仰的时期，但在大学毕业后不久，我遭遇了信仰的危机。作为大学生，又作为一名天主教徒，我度过了一段令人兴奋的时光。在学校中，我们阅读法国天主教作

家的著作：贝尔纳诺斯、布洛伊、佩吉、莫里亚克、马里顿和德日进。我们也读英国作家的作品：G.K.切斯特顿、格雷厄姆·格林、伊夫林·沃，还有霍普金斯。我们还读西格里德·温塞特和安托万·德·圣-埃克苏佩里。神圣的珩鸟在每一页纸上跳跃，成群地伸展双翼，扑棱着翅膀制造骚动，淹没了它们尖细的、充满怀疑的窃窃私语。艾米莉·狄金森把希望叫作“有羽毛的东西”。珩鸟就是我们的希望，是信仰，是慈爱。后来的某天，我一觉醒来，我的珩鸟已经不见了。屋顶上一只嘲鸫正在唱着动听的歌，但是珩鸟已经回到了高原，无影无踪。我投向科学书籍，忙着自己的人生事业。但有些东西已经失去了——“有羽毛的东西”。上帝缺席的时候，我试图创造出鸟类学的神学。我聆听冬天里山雀的双音节叫声，品味春天里草地鹨的甜美又忧伤的歌喉。我等待正午时画眉鸟婉转的咏叹调，也期盼黄昏里喧鸻的刺耳尖鸣。但是，神圣的珩鸟仍然在高原上和风雨同行。有时我的内心深知，它已经一去不回了。

在夜晚最黑暗的时候，在星光下，我听到那干涩的啼鸣。那是风声还是珩鸟在屋后的小山上徘徊？我看不见珩鸟，因为它有着干草色的外表和风声般的啾鸣。19世纪鸟类学家法兰克·查普曼这样记录高原珩鸟：“在一片草场上策马而行，只匆匆一瞥，根本无法察觉一只珩鸟的踪影。但若仔细搜寻，认真探查，总会发现潜藏其中的珩鸟其实并不在少数。”而上帝，也像珩鸟一样隐藏在干草、雨水和夜晚最暗的星光中。

※

用后院的望远镜就能看见类星体3C 273。我用我的14英寸（约35.6厘米）口径的望远镜看到过它。如果不查看星图，我永远不会得知我看到的究竟是什么。类星体3C 273看起来和任何一颗暗弱的蓝色恒星一样，处在我所使用的望远镜的观测极限。3C 273看起来就像室女座成千上万的、暗淡的十三星等的恒星中的任何一颗。为了找到它，我将我的望远镜指向明亮的室女座恒星太微左垣二，然后向西北方扫过几度，直到视场中出现与星图上的位置相吻合的那颗星。太微左垣二距离我们35光年远，按照宇宙的尺度来说，它是我们银河系的邻居。比它距我们更近的恒星只有二三百颗，它们当中大部分都很渺小，而且暗弱，甚至无法用我的14英寸望远镜观测到。类星体3C 273距离我们15亿光年远，比太微左垣二要远1亿倍，远在银河系所有恒星之外，远在其他数以亿计的可见星系之外。类星体3C 273距我们15亿光年，它的光来自15亿年前。望远镜里这个寻常的小亮点是我目睹过的最接近宇宙诞生之初的东西。这个蓝色小光点，是我对宇宙创生之后令人目眩的光辉的匆忙一瞥。

自然为我们提供了一种回顾早期宇宙的方法。光线从遥远光源来到地球需要时间。当天文学家通过他们的望远镜看到遥远的天体，他们就正在回溯历史。恒星几光年远，星系数百万光年远，而类星体离我们几十亿光年远。我们靠类星体可以回溯几十亿年的时光。类星体是目前我们可以观测到的最遥远的天体。3C 273的光是迄今为止进入我眼中的最古老的光。

※

1963年，加州理工学院的马尔滕·施密特首次发现了类星体。施密特捕捉到了照片底片上类似恒星的天体的光谱，光谱中大量射电能量的发射吸引了天文学家们的注意。这些天体被称为“类似恒星的射电源天体”，简称“类星体”。它们的光谱非常奇怪，与其他任何恒星的光谱都有所不同，光谱的颜色与任何已知物质的辐射形式都无法匹配。天文学家对此十分困惑。后来，灵光乍现的施密特在神秘的光谱中认出氢原子光谱的伪装特征，典型的氢辐射波长已经朝着光谱的红端（长波方向）急剧移动了！只有多普勒效应会造成波长变长，即光源和观测者之间的分离运动导致了光的波长的延伸。如果所有这些天体都在后退着远离我们，那一定是因为它们受到了宇宙整体膨胀的影响。光谱上罕见的巨大红移提醒了施密特，这些天体离我们特别遥远，比之前观测过的所有天体都更远。

如果宇宙均匀地膨胀，那么遥远天体的星光的红移程度，与该天体到我们的距离成正比。3C 273曾经被施密特考虑当作射电源。它的红移对应着每秒48000千米的后退速度，是光速的16%。3C 273和施密特其他样本中的类星体显然相距我们数十亿光年之远，比如今可见的最远的星系还遥远。它们的光从宇宙诞生之初就开始向我们奔来。

但是类星体比遥远的星系要明亮闪耀得多，这就是为什么我能在自己14英寸的小望远镜里看到这些自宇宙初期就开始燃烧的火炬。这些跨越亘古向我们招手的物体，这些用对远古纪元的惊艳一瞥引诱我们的物体，究竟是什么呢？从它们闪烁的光芒中，天文学家可以推断出类星体的尺寸是非常小的，可能还没有我们的太阳系大。可它们却又比整个银河系还要明亮1000倍，它的光辉可以掩盖百亿个太阳的光芒。

有些天文学家不愿意相信这么小的东西内里却能爆发出如此巨大的能量。他们希望证明类星体其实就在我们附近，这样就不需要相信类星体真能明亮至此了。不过，如果类星体真的离我们很近且不受宇宙膨胀的影响，那又是什么造成了它们光谱的剧烈红移呢？

现在类星体的宇宙学距离几乎得到了广泛接受，但至今还没有人知道这些奇怪的来自宇宙创世之初的神秘旅行者的本质是什么。如今越来越多的人达成共识，认为类星体其实是非常遥远的星系的明亮核心。也许在恒星密集的星系中心区域，引发了连锁的超新星爆发。但由于星系本身太过遥远，所以我们完全看不到。更有可能，它们是年轻星系的核心，其中心是猛烈吞噬周围物质的超大质量黑洞。由于黑洞强大的引力，周围物质在快速落向黑洞的过程中释放出巨大的能量，使得类星体成为宇宙中最耀眼的天体。

巡天观测已经证明，类星体的数量随着距离的增加而增加。显然，这些天体在宇宙的早期比在今天更常见。如果类星体的黑洞模型是正确的，那么在年轻星系的演化过程中，有一个典型的阶段就是形成大质量

的中心黑洞。恒星坠入这些巨大的宇宙深坑，就像水流回旋着被冲入下水道，速度逐渐增加，直到接近光速，在所有波段以辐射的形式释放出丰富的能量。数百万的恒星坠入宇宙黑洞那大张着的深渊巨口。这些星系初生时所承受的剧烈痉挛现在大多已经平息下来了，包括我们的银河系在内，它们现在以一种更为平静的方式存在着。

原始宇宙中，类星体不仅比现在数量更多，也更加明亮。我们甚至可以嫉妒当时更加璀璨的夜空。那时候星系之间比现在靠得更紧密，在炽热的蓝色恒星的光芒下灼烧。在那些硕大光轮的中心，物质流进黑洞，被引力拉扯成令人难以置信的密度，永远坠入黑暗——恒星、行星、卫星、雨和风，全部无法逃离，一去不回。流入黑洞的物质释放出巨大的能量，滋长了星系的核心，让它们散发出无与伦比的光芒，掩盖了天空中其他的星光。宇宙闪耀着光的信标，这是光明的时代。

※

在大型大视场望远镜为夜空拍摄的单张照片上，可能容纳着多达20万颗疑似恒星的光点。也许它们当中的几百个就是类星体。这些隐藏在众星之间闪耀得怪异的天体，就像躲藏在干草中的珩鸟。它们低频的氢辐射混淆在星光中，就像珩鸟的歌声藏在风里。如果120亿年前的地球上有人类存在——如果那时有地球的话——他们就会目睹类星体在夜空中的各个角落燃烧，散发出足以致盲的光亮。我们的银河系的核心是什么样子呢？过去也曾经是类星体吗？如果是这样，那么它的光芒就也曾击倒了我们，晃动了芦苇，压弯了干草，比1000个太阳更耀眼。它看起来会像天上的玉石，像纯净剔透的水晶。恒星只能隐没在它的光辉里，昴星团的迷人微笑不再甜美，巨人猎户座在它面前也只能自惭形秽。

圣保罗被锤击炼钢炉所迸出的火花撞击到地面上，圣约翰目视它在盛夏炽烈阳光下燃烧，葡萄牙的特蕾莎女王沐浴着绚丽夺目的华美光芒。看起来，神秘主义者们直观地体验到了创造的光彩。现在，它们一去不回了。那种古老的光辉，数十亿年前年轻宇宙中那种纯净光芒的洪流，都一去不回了。当我决定找寻3C 273这个相对近一些，又是我们天空中最亮的类星体的时候，我等待了一个星期，盼来了无月夜；又等了一个星期，盼来了晴夜。我希望室女座尽可能地高出地平线，这意味着我要在寒冷的2月的夜晚等到黎明。几个星期的等待似乎并非没有理智。我所追寻的暗光，在类星体逐渐远离地球的情况下，已经在宇宙中朝着我行进了几十亿年。当进入我的望远镜的光离开3C 273的时候，地球上还只有海洋中浮游的单细胞微生物。这些没有进化出双眼的生物看不见年轻银河系的璀璨，也看不见无数装点夜空的燃烧着的巨大蓝色恒星。我沿着北斗七星移动望远镜，让它向着大角星画出弧形，直到能窥视到角宿一。角宿一是室女座最明亮的恒星，是引领我找到类星体的信标。我屏住呼吸徒手操作，并不使用旋钮，小心翼翼地移动望远镜，从角宿一挪向太微左垣二，挪向黑暗，跟随着星图的指引穿过零星的暗星。最终，3C 273悄悄溜进我的视野，谨慎小心，隐姓埋名，穿越光年的距离，把创世之初的光辉压缩为暗房里的一个小光点。就像一只鸟儿

在高地的雨水中哭泣，微弱、遥远。在我见到这个类星体的时候，天空开始变亮，类星体几乎即刻就要消逝在太阳的光辉里。我想起《瓦尔登湖》的最后一段话：“使双眼视而不见的光亮，对我们来说就是黑暗。当我们清醒时，曙光才会破晓。来日方长。”

7　蛇与阶梯

类星体，最遥远的可见天体，在它们光谱中展现了熟悉的氢的特征。在猎户座恒星之间的尘埃和气体云里，天文学家已经探测到泄露天机的碳、氧、氮、硫和硅的辐射。在星际空间的稀薄环境里，他们还发现了水、氨、乙炔、乙醇以及地球上常见的许多其他分子。看起来，宇宙在建筑材料方面是公平的。星系和恒星、行星和卫星、细菌和蓝鲸，它们全都只不过是92种元素的不同排列。

给我92种元素，我能创造一个宇宙。无处不在的氢，冷漠淡薄的氦，令人恐惧的硼，内涵深刻的碳，行为放荡的氧，忠诚可靠的铁，神秘莫测的磷，另类新潮的氙，自以为是的锡，左右逢源的汞，动作迟缓的铅……如果你愿意，想象一下，有一间储存着92种元素的化学储藏室。拔掉软木塞子，打开阀门，倾倒那些小盒子与小罐子，看看会发生什么。能量释放，能量吸收。原子相互连接形成分子。简单的分子重新组装起来形成复杂的分子。火花、闪烁、烟火、光芒。化学元素的暴乱。常见的和不常见的组合。这些是掌控秩序的狂怒的元素。这些是对生命充满热情的元素。元素的意义，比我们双眼能看到的更多。锶是银色的，它的盐燃烧时却是深红色的；钙调节着心跳，在我们的身体中基本储存于两个地方：牙齿和骨骼；我的每一口呼吸都吸入了氮，它构成了蛋白质的主干，也是TNT炸药的主要制作材料；砷会杀死你，但它的某些化合物却是药物；懒惰的氩做什么都显得毫无用处，可如果取一个惰性的气态氩的原子，再让它撞上一个额外的质子与一个额外的电子，就能得到固体状态的活跃的钾；地壳中所含的钾的自然放射性，推动了物种的基因突变，驱动了生物的进化。

为什么哲学家吝啬于关注这些有魔力的、多变的东西？在西方思想史的早期，物质扮演着创造世界这幕戏剧中最不重要的角色。担当主演的是光、力量、能量、精神。物质只是宇宙的浮渣，是谷糠，是存在链条的底端，是地球通往天堂最高处的价值阶梯上的最低一级。物质是野性丑陋的半兽人卡利班，而光是空气中缥缈的精灵爱丽儿。[14]物质是精神的负担。

20世纪，物理学走过了相当长的道路才把物质从哲学范畴的低迷中拯救出来。最近在高能粒子物理方面的研究表明，相较于阶梯，事物的存在链条更像是一条咬着自己尾巴的蛇。探索原子的内部，物理学家遇到了星系的宇宙。在物质的核心处，他们窥见大爆炸的光芒。卡利班摘掉自己的面具，他就是精灵爱丽儿。

※

我有一个朋友，名叫安妮·撒克逊。她出身于一个石匠世家。她的弟弟伊万仍在雕刻石头——他继承了家族的事业。他能刻出新英格兰最出色的墓碑。石头就是伊万·撒克逊的生命，“撒克逊”的含义就是石头。安妮是一位学者。她生活在思想、艺术和光的世界。“光奇怪地进入我的眼睛。”她坚持道。她改变家里的家具的位置，她把墙壁铺满壁纸，她从来没有放弃绘画。她正在塑造光，她说，她想尝试让物质“通通风”。她在天花板上安装天窗，她凿破墙壁装上窗子。圣诞节的时候她会在每扇窗前都摆上蜡烛。她严格规划自己的生活，在日出前起床，日落后很快就睡下。她坚持艾米莉·狄金森所说的新英格兰典型的“对光的奇怪偏见”。她试图活出“空灵”的生活状态。她说：“物质只是实现审美的手段。”安妮曾经与我谈论她为什么喜欢教堂，她说，教堂的礼拜仪式，就像是新英格兰的独特光辉。我感觉，促使安妮·撒克逊去教堂和让她在自家屋顶上开洞的原因是一样的，她布置物质为的是精神方面的效果。毕竟，基督教的圣餐礼的意义不也正是如此吗？

用简朴的话语来形容，伊万·撒克逊是一个简单的人。他是大自然的工程师，是一位农夫。伊万深爱着乡土。植物可能依赖阳光进行光合作用，但伊万负责照顾它们的物质需要。植物为了扎根，需要多少肥料、多少水，他对此有着准确无误的直觉。伊万考虑的是物质如何汇聚在一起，如何起作用。很长时间以来，他担心家传的银制餐具会变色。某一天，他看到当地政府寄来的邮件上说，镇上的供水所含盐分过高，建议对钠的承受度不高的人不要饮用。伊万把这个消息和餐具的事联系起来，终于让它们重新闪闪发亮。

伊万对光影的转换不感兴趣。他感兴趣的是那些稳固的、看得见摸得着的东西，比如石头。他说，花岗岩会永久存在，他在乎这样的东西。在纪念碑店铺，他用双手接过新交付的石头。它会被日晒雨淋吗？它会褪色吗？它会有裂痕吗？它柔软吗？它坚硬吗？他永远不会满足于现在的工作成就。他见过历史上那些伟大的石匠的作品，他知道他还比不上这些人。但他了解石头。多年以前，在用黑色花岗岩制作墓碑成为时尚的时候，伊万觉得很困惑，他认为这对新英格兰来说不是最佳的选择。花岗岩不是本地产物，它在这里的状态不对。黑色花岗岩来自非洲，是一种热带石材，在这里用来书写不会有很好的效果。人们想让伊万在黑色花岗岩上用白色颜料书写。“画在花岗岩上！”他嗤之以鼻地重复，“颜料只能用在木材上！”人们想让伊万在墓碑上涂绘独木舟、猎犬和骏马，可他不喜欢那样。他宁愿刻上十字架和六芒星。石头才是永恒的，他说，不应该用来铭记那些傻里傻气的东西。他尤其喜欢用希伯来语书写自己的作品。他喜欢那些字母，喜欢那种奇怪的上帝的语言的神秘感。他去犹太教堂验证自己的想法。他雕刻石头靠的是理性。伊万可以滥用自己作为新英格兰人天生的坏脾气，但对于花岗岩，他坚信，不应该被滥用。

安妮生活在对光的追求中。伊万紧抱着他那满是灰尘的石头。阳光从来不会进入伊万工作的小屋。他呼吸着石材，粉尘为他的肺裹上一层外衣，在他的手指甲底下攒下了消磨不去的痕迹。而安妮每天早早起

床，只为抓住破晓时分纯洁的阳光。我认识他们两个人。他们就像是同一枚硬币的两面。他们是咬着自己尾巴的蛇。在伊万的石头粉尘里，存在天使的圣光。而在安妮的墙壁上的光影游戏中，物质也正翩翩起舞。

※

物质的经典概念是指形态为固体且具有质量的物体，就像受到握紧的拳头挤压的潮湿石头粉尘。如果物质由原子组成，那么原子也一定具有固定形态和质量。20世纪初，原子被想象成微小的圆球，或是花岗岩般的微小颗粒。在那之后，在尼尔斯·玻尔的物理学中，微缩的小球变成了类似乐器的东西，变成了精确调校过的缩小到100亿分之一的小提琴。随着量子力学的出现，“乐器”让位于纯粹的音乐。在原子的尺度上，物质的固体形态和质量都消解在光和虚空之中。突然之间，物理学家开始用作曲家的语言来描绘原子——“共振”“频率”“和谐”“级”。原子电子在合唱团中歌唱，等级和秩序如同炽天使、智天使、座天使和主天使。[15]物质和光之间的典型区别变得模糊不清。在新的物理学里，光可以像粒子一样反弹，物质也可以像光一样产生波的涟漪。

最近几十年，物理学家在物质的乐章中发现了优雅的亚原子结构。他们采用一种奇怪的新语言描述亚原子的世界：夸克、超夸克、胶子、奇异夸克、粲夸克。还有上夸克和下夸克、顶夸克和底夸克。常规物质中最简单的成分，例如质子，具有巴赫赋格曲的特征，由四个声部构成一个完整的复调：物质、能量、空间和时间。物质的核心是琶音、半音和切分音。在物质存在最低的音阶上，宇宙诞生了。我们最终理解了维持原子和宇宙紧密结合的四种基本作用力，这对我们来说是一个值得纪念的非凡进程。让电子紧靠原子核的是电磁力，产生放射性衰变的是弱相互作用力。温伯格-萨拉姆理论成功地把这两种力用单一的概念统一起来。量子色动力学在解释“原子核内部结合质子和中子的是强相互作用力”方面取得了巨大的成功。全新的、高度推测中的“超对称理论”试图统一电磁力、弱相互作用力和强相互作用力，最终将束缚星系的引力也包括进来。这种“大统一”将实现爱因斯坦用一个无所不包的理论解释自然界全部作用力的梦想。

天文学家和粒子物理学家已经进行了卓有成效的对话。天文学家已经意识到，宇宙的大尺度结构可能是大爆炸初期粒子间微妙的相互作用决定的。同时，粒子物理学家也希望在天文学家的深空观测中找到证据，验证自己关于亚原子结构的理论。蛇已经咬住了自己的尾巴，别让它溜掉。

※

迄今为止，用于研究物质的最重要的设备是粒子加速器。这些机器完全是1932年由欧内斯特·劳伦斯制造的5英寸（12.7厘米）直径回旋加速器的后代。它们用电场加速粒子束达到高能状态，并利用磁场引导粒子聚焦。聚焦的加速粒子束撞击到另一些静止的粒子，或者与那些反方

向运动的粒子束进行对撞。在这些撞击的残骸中，物理学家寻找着组成物质的终极成分。而略带讽刺意味的是，越是要探索物质结构中更深的层次，就越是需要更高能量的机器。

在美国，加利福尼亚的斯坦福线性加速器中心、芝加哥附近的费米国家加速器中心和长岛的布鲁克海文国家实验室都具备主要的研究设备。当前，费米实验室的超导质子同步加速器是它们当中能量最高的机器。这台机器被设计来通过3.5英里（约5600米）直径的超导磁铁环将质子加速到产生1万亿电子伏特的能量。1电子伏特可以让一节干电池传输1个电子或者质子。费米实验室的机器应用相当于将1万亿节干电池的能量作用于单个的质子，以将其撞成碎片，之后，物理学家就可以在质子残片中寻找新的发现。

在美国物理学家调试他们的大机器的时候，欧洲人争先恐后地赢取奖项。日内瓦附近的欧洲粒子物理实验室（CERN）的碰撞粒子束加速器，是首台运行达到数千亿电子伏特能量的机器。1983年，CERN宣布发现了难以捉摸的W和Z_0粒子。这两种粒子在之前已经被电磁力和弱相互作用力的统一所预言。这项发现为该理论提供了令人震惊的验证（预测了粒子的存在），同时，也大大地激励和鼓舞了欧洲粒子物理学家，显著提高了他们的士气和声望。

日内瓦发现W和Z_0粒子的成就刺激了美国物理学家更努力地建造最大的机器。在能源部的高能物理咨询委员会建议下，美国物理学家放弃了布鲁克海文还未完成的碰撞束加速器研发工作，转而立即投身于为时12年的“超导超级对撞机”的建造工作。这台机器的研发将耗费数十亿美元，是当时历史上最大、最昂贵的科学仪器。计划中，这台机器将被掩埋在一座直径100千米的环形隧道中。它被称为“沙漠加速器”，因为它只能建造于美国西南部平坦的沙漠地带。它将把两束质子流加速到产生20万亿电子伏特的能量，再让它们迎头撞击。在这场悲壮撞击仅存的碎片中，物理学家希望找到能带领他们实现作用力“大统一”的线索，从而理解宇宙的起源和结构。

雄心勃勃的梦想，也可能是不切实际的梦想。社会大众可能会抵制花费数十亿美元来建造一台只能生产粒子的机器，况且这些粒子存在的时间极短，甚至来不及观测，只能推断它们是否真实存在。[16]但物理学家充满希望。他们发现，物质具有令人惊讶的美感与质感。物质是建筑砖瓦，也是建筑师；物质是音乐，也是作曲家。它是蛇的头和尾，是万物的最初，也是时间的最终。物理学家希望在尽可能的范围内探测到最小尺度的物质，而这些发现将揭开曾经困扰了神学家、哲学家和科学家的终极奥秘。宇宙是什么？宇宙从何而来？宇宙要往何处去？像萤火一样在物质表面起舞的名为生命的东西又是什么？

※

玛丽·居里，这位发现了镭元素的杰出的物理学家，在处理了成吨的

捷克斯洛伐克沥青铀矿后从中获取了极小一部分的新元素。她提纯了新物质，把它装进玻璃瓶。这种被她发现的新物质，是元素周期表上最重的元素之一，基于这个原因，文艺复兴时期的炼金术士帕拉塞尔苏斯一定会认为这种物质存在于创世的根基处。但是，玛丽·居里的镭玻璃瓶发出了诡异的绿光。它发出的绿光，和穿透望远镜的猎户座大星云的光一样，和时间边缘遥远的类星体燃烧而成的光一样。它的光来自创世之初，来自原初火球的闪耀，来自宇宙大爆炸。玻璃瓶里的光来自元素的自然衰变，物质奉献了自己，释放了纯粹的能量。

神圣的光芒把圣保罗从马背上掀翻。玛丽·居里也因为这种光芒而患病。就在她忙碌着把镭元素从杂质中释放出来的时候，看不见的死亡射线穿透了她的身体。在玻璃瓶里，怪异恐怖的辉光就是咬着自己尾巴的蛇。天使的光芒混合了尘世的烟灰。在居里夫人最后的岁月里，她饱受放射性辐射的残害，风寒和发热缓慢地摧毁她的身体，让她深受折磨。在她去世后，她的女儿说："她已经融入了那些她挚爱的物质。她奉献了自己的生命，永远地与它们融为了一体。"

居里夫人后院的工作间，是连阳光也无法抵达的地方。她就是在那里偶然发现了物质和能量的等价关系。基于这种等价性，宇宙学家就能逐步理解大爆炸的辐射、星系物质的诞生、类星体的驱动力和恒星燃烧的神秘原因。光和物质，在居里夫人指甲下的沥青铀矿的灰尘里达成了一种奇妙的统一。然后，光杀死了她。

8　星尘

只有胆大妄为的人，才会使用隐喻。使用隐喻，就像高空走钢丝，就像发射炮弹，就像在没有安全网的情况下凭空翻跟头。隐喻的麻烦在于，你永远不会知道它们什么时候会让你失望。你在半空翻跟头，站上摇晃的秋千——然后突然，秋千消失了。

用蝴蝶举个例子吧。当然，对于使用隐喻来说，蝴蝶是一个安全的赌注。美丽的娇柔，生命的脆弱。《牛津英语词典》用了半页篇幅来解释蝴蝶这个词代表的全部含义：虚荣、轻率、易变、轻浮。甚至连莎士比亚也这样说："人们都是像蝴蝶一样，只会向炙手可热的夏天蹁跹起舞……"[17]

随之而来的是黄缘蛱蝶。或许稍早一些，在2月，最迟在3月，蛱蝶就已做好准备伸展翅膀。今年是在2月，格外温暖的一天，我蹬着自行车，骑行在还没有完全融化的雪地上。这时，咔！我撞上了春天的第一只蛱蝶。它一定才刚刚从冬眠中苏醒过来。几分钟之后，它的翅膀彻底被2月的阳光焐暖了。这个小东西可能躲开了碰撞，但身体还沾染着沉眠的余韵，带动运作的齿轮和铰链仍然僵硬。它大摇大摆地凭空出现在我的前方。我感觉到它易碎的鳞片刷在我的脸上，如同云母般脆弱，深棕色，边缘是明亮的黄色，点缀着暗蓝色的斑点。这对翅膀有8厘米宽。2月中旬，这样精致的小东西是从哪里来的？

黄缘蛱蝶是新英格兰最常见的过冬的成虫。其他物种只能在幼虫阶段，或是把自己紧紧地裹在茧里过冬，而成虫会移居到更温暖的地方去。但黄缘蛱蝶并非如此。风雪来临的时候，蛱蝶会寻找一棵中空的大树，或是一丛衰落的叶子，像熊一样在里面冬眠。只不过它没有温暖的绒毛，也没有厚厚的脂肪层。这只单薄脆弱的小东西，能在冷酷致命的寒冬中幸存下来，我总觉得是个奇迹。但每一年，在第一个温暖的春日，也许是在冰雪开始消融的2月，黄缘蛱蝶就会挥动着棕黑色与黄色相间的翅膀飘飘而出。在其他昆虫还缩在卵里尚未孵化的时候，蛱蝶已经在呼吸着春日的甜美气息了。

这就是隐喻。美丽是脆弱的吗？生命是短暂的吗？根本不是。恰恰相反，它坚强，它不可磨灭，它生生不息。黄缘蛱蝶一直在证明这一点。

※

我必须说，在我的手册上写道，新英格兰的整个冬天，黄缘蛱蝶都

在冬眠，可我从来没发现过冬眠中的蛱蝶的成虫。但是，我见识过这种无与伦比的昆虫的其他阶段。蛱蝶在榆树、柳树和杨树的小树枝上孵化。它的幼虫是身上覆着丝绒般黑色绒毛的柔软毛虫，嵌着红白色的斑点。它用褐色的胶状物质把自己蜷成一个蛹，顶端的茧尖用红色装饰。成熟的黄缘蛱蝶在夏末从蛹中钻出来，以花粉和花蜜为食，直到冬天来临，进入冬眠。当蛱蝶在2月或3月醒来的时候，它们就又能发现花粉和花蜜。这也是奇迹的一部分。

在英格兰，黄缘蛱蝶是来自欧洲大陆的稀有移民，被称作坎伯威尔的美人。在欧洲大陆，同样地，蛱蝶也会宣告春天的到来。我不会忘记纳博科夫在自传中写下的一段可爱词句，他在回忆自己1916年春天发生在圣彼得堡的第一段青涩的恋爱时说道："坎伯威尔的美人，浪漫如旧，晒干它青肿的翅膀，它们的边缘因冬眠而苍白，就在亚历山德罗夫斯基花园的长椅的背后。"圣彼得堡的冬天肯定比新英格兰的冬天更难熬。然而，蛱蝶在那里还是幸存下来，睡在中空的大树里，薄如纸张的翅膀勇敢地折叠起来抵抗严寒，之后以某种方式奇迹般地在春日的温暖阳光第一次重回大地的时候复苏，再度在公园里嬉戏，一瞥夏天的美丽。

黄缘蛱蝶的忍耐力，就是衡量物质多样性的证据。蛱蝶留在柳树枝上的虫卵，要孵化为幼虫，靠的是包裹在DNA螺旋之外的蛋白质抵御恶劣环境。季节变化让虫卵重新活跃，来自柳树枝和空气里的原子成了组成毛毛虫结构的原料，其中主要是碳、氧和氢原子，也包含少许氮、磷和铁原子，还有其他任何必需的元素。这些原子在这里或那里黏合在一起，组合成发育中的蠕虫所需要的一切：形状、身体、结构和恰当的电平衡。在这之后，在蛹的内部，所有相同的原子重新洗牌，它们仍然受到DNA的指引，改变身体结构，组成蝴蝶的成虫。一些组成蝴蝶身体的原子，随着产卵离开了原本的身体，成为下一代蝴蝶的一部分。而当成虫死去的时候，组成它的原子最终会渗入地下成为其他生物的组成部分，或是被土壤与石头吸收掉。

如果能追踪一个碳原子就太棒了，就像鸟类学家在某只鸟身上捆绑某种微型发射器，让我们可以追踪它的旅程。碳原子，是我们已知的最稳固的物质（前提是碳元素不以碳-14那样的放射性形式存在）。每个碳原子一旦存在就会一直存在。地壳中的碳原子在地球形成之前就是太空中尘埃星云的一部分。地球表面的碳原子就像朝圣者或吉卜赛人一样四处漫游，钻进岩石，跃入海洋，浮上空气，融入生物的身体。它不拘一格，可以和任何东西结盟。有时候，它会加入两个氧原子的团队，以CO2的身份穿街过巷。或者，它会结合蛱蝶蛋白质中更大量的氮、氢和氧。再或者，它可能坚持以某种自身固定的排列形态存在，形成一颗钻石或一块石墨。如果我们标记它、监视它，会发现它始终在发出微小的信号，宣告着自己当下的位置。

想一想，原子如风一般舞动着拂过世间万物。事物流逝变迁的背后是事物的永恒。赫拉克利特说："一切皆流，无物常驻。"黄缘蛱蝶的身体就像一条河。你不能踏进同一条河两次。我们生活的世界是燃烧的烈

焰，我们在其中烧灼，我们一直沐浴在火焰里。蛱蝶的燃烧就像是安慰的语言，向季节致敬。岩石一直在经受火焰缓慢、持续的炙烤。如果我们能看到灌木丛上跳跃的火焰，与摩西所看到的相同；如果我们能看到每一棵树都无时无刻不在经受着烧灼，所有的枝干都包裹着火焰；如果我们能看见风，看见河，看见原子不断地流动，我们会惊奇于任何事物都会持续下去。赫拉克利特说："物质善于隐藏自己的真实构成。"诗人玛丽安·穆尔也说道："可见的力量是不可见的。""房子、星星、沙漠，"飞行员对小王子重复道，"真正使它们美丽的东西，是看不到的。"哲学家、诗人、物理学家和神秘主义者的老生常谈如同刺在他们耳朵上的文身：黄缘蛱蝶的力量，它的美的适应能力，让它坚韧的原因，让它那优雅火焰无可摧毁的根源，是那些不可能看得见的东西。地球的表面在燃烧着，这火焰只是一种肉眼无法可见的持久物的传递。氢、碳、氧、铁，这些真正重要的东西，是不可简化的、永恒的、隐藏的财富。这些就是火焰的元素。

※

今天早上，我看到燃烧着的天空，看到太空中恒星之间流动着的物质。我在黎明前起床，捕捉到了夏天东方夜空中的星座。织女星、天津四和牛郎星出现在未明的天际。一时心血来潮，我取出望远镜，开始寻找微弱的光芒。首先，我找到了天琴座的环状星云。在我的望远镜里，这个星云看上去就像一个微小的烟圈，灰暗、朦胧。我没有费心给望远镜接上电动马达，所以电机还不能补偿地球的自转。在地球迎着太阳向东转动的时候，环状星云飘过了我的目镜的视野，被强化了的烟圈形象在太空中游荡。环状星云是行星状星云，在夜空中呈盘状，样子模糊，早期的观测者习惯把它们想象成行星的圆盘。但是，环状星云的距离比行星远得多，有1500光年。这是一颗垂死的恒星吹出的气泡。在我的望远镜中无法看到那颗恒星脱离尘埃外层的裸露核心，但是用更大的天文台望远镜拍摄的照片可以向我们展露出恒星被包裹在气泡中心的样子，就像是躲在明亮的茧里的蝴蝶幼虫。

这就是恒星死去的方式。所有活着的恒星都会散落物质，就连此刻的太阳，都正在将自己物质的光环吹向太空，这种缥缈的物质流被称作太阳风。当引力让星云坍缩为致密的球体时，恒星就会从空间中的气体和尘埃之间脱胎而出。而恒星，自它们诞生的第一天起，就又开始把气体和尘埃返还到空间中。50亿年来，太阳燃烧的同时呼出一丝微弱的气息，呼出一束物质流。地球就沐浴在这样的物质流中，原子和亚原子粒子的太阳风为地球的大气层提供了能量，点燃了极光。这整个过程，也仅让太阳损失了原始质量的一小部分。但是在恒星生命的最后，往往会加速向空间进行物质返还，特别是如果恒星的尺寸很大，推出的物质就会更多。随着维持恒星燃烧的核燃料耗尽，恒星会进入一个不稳定的阶段。重力向下压碎恒星的核心，热核反应使它膨胀，打破平衡，最终它不得不吹走自己的外层物质。1万多年前，1500光年远的一颗恒星抽搐起来，吹出了环状星云。再过5万年，我们在宇宙空间中看到的气泡将

继续扩张弥漫，以至于再也无法被观测到。到那时，来自天琴座垂死恒星的烟圈，将消散为布满星际的介质。

※

我把望远镜从天琴座的环状星云上转开，向下望向地平线，寻找狐狸座的哑铃星云。书上说哑铃星云比环状星云更亮，但我想找到它总是很费劲。就比如今天早上，这项任务因为黎明的曙光即将降临而更加困难了。这个星云的名字源于它的形状，“两团模糊的物质彼此连接”，但今天早上，我没法看到比一个萦绕着苍白光芒的昏暗椭圆形更清晰的东西了。我无法用14英寸望远镜看清它。但书上说，在哑铃星云的中心有两颗恒星，组成一个双星系统。就我所知，目前还没有人能确定究竟是这两颗恒星中的哪一颗推出的物质形成了哑铃星云。其中一颗恒星，经受了临终的痉挛，吹出了它的表层物质。星云里的物质只是原恒星质量的一小部分。这颗恒星失去的只是它的外层，就像一只蝉蜕下了它的甲壳。

靠近地平线的天空逐渐明亮，哑铃星云褪去光辉。我把望远镜重新滑向天琴座的环状星云，可几乎同时，环状星云也隐匿在旭日的晨光里。环状星云中的物质总质量，经过计算，大约是太阳总质量的10%。它的成分比例可以通过光谱来确定。在这些物质中，每1700万个氢原子，就有100万个氦原子、1万个氧原子、5000个氮原子、1500个氖原子、900个硫原子、130个氩原子、34个氯原子和4个氟原子。其中当然也存在着碳，以及被揭露的真相。

行星状星云中这些重于氢的元素的相对丰度明显超过了周围的星际空间。例如，相对于氢元素含量，行星状星云中的氮元素含量是星云的前身恒星诞生的星系云的10倍。天文学家觉得他们知道原因所在。当恒星燃烧的时候，它们把氢转化为氦，接着把氦转化为碳，然后是氧，再然后是氮，最终成为铁。这个过程被称作热核聚变反应，与氢弹爆炸的过程完全一致。在恒星核心发生的原子核剧变的过程中，被融合的核心的一小部分质量转化成了纯粹的能量。正是这部分能量，让恒星能够发光发热。恒星的燃烧，就是用较轻的元素重建出较重元素的过程。这些重塑出的沉重元素会乘着和缓的星风，或是更剧烈些的、行星状星云膨胀出的泡泡回归太空。有时恒星将物质剥离自己的这个过程不光要经历痉挛的阵痛，还会造成灾难性的后果——如果它们作为超新星爆炸了的话。恒星在燃烧的时候产生元素。在恒星核心的工厂里，引力让重元素挤在一起。这件作品足够让雕刻大师切里尼嫉妒，它比珠宝巨匠法贝热为沙皇制造的宝物更令人陶醉。氧原子，因外层的6枚电子而闪闪发光，在化合、燃烧、生锈、腐蚀和创造的过程中恣意释放它的怒火，地球上没有别的原子比它更常见。碳，这位魔法师，现在成了黑骑士，时而身着低调内敛的墨色，时而化身钻石张扬闪耀。它是组成蝴蝶、尼龙、汽油、鞋擦、炸药和农药的骨干成分。铁，工业的象征，地球的核心，夜晚的飞行者，因纽特人用天上掉下来的铁陨石制造工具。钯、锆、镝、钆、镨，这些罕见的旅行者散落在超新星的遗骸中，它们散布

于星系，就像从国王的马车里撒出的大把钞票一样。

太阳诞生之前，百代恒星在银河系中诞生、消亡，将原始的氢转变成未来行星诞生所需要的材料。今天早上，在环状星云和哑铃星云中，我见到了宇宙抛撒的钞票。就在今天早上，我看见两颗恒星把英国便士变为美元，再把美元变成镶嵌了金边的证书。一个碳原子，就是一张值得拥有的证书。环状星云和哑铃星云抛撒这些证书，就像狂欢节上的人群挥扬五彩碎纸屑一样毫不吝啬。

※

除了氢和一部分氦，地球上的每一个原子，都是由恒星炙热的核心或是恒星到达生命终点所伴随的剧烈痉挛制造的。我写字用的铅笔中石墨的每一个碳原子，都贴着“金牛座制造”或者“猎户座制造”的标签。宇宙在燃烧。原子流出恒星，穿越星系，现在，它们是猎户座马头星云中的尘埃，或已经成为一颗新行星的地壳，就像货币流通，就像棒球手传球。原子穿过黄缘蛱蝶的身体，在每一次呼吸之间，只做短暂的停留。整个地球的表面，每一秒钟，都像蛹中的蛱蝶一样，正在重新组织成新的形式。赫拉克利特说：“太阳每天都是崭新的。”他的哲学表述也许只是字面的意思？“雷电驱动万物。”他说，宇宙激情燃烧着，适度点燃，适度熄灭。走进一条河，烧起一只脚。走进同一条河，再次烧起同一只脚。可既不会是同一条河，也不会是同一只脚。

英国作家黎里相信，鸵鸟消化硬铁以维持自己的健康。黄缘蛱蝶消化硬铁，留在肚子里的是美丽。百亿年之前，美丽从恒星中飞出来。可见的力量是不可见的。恒星像烟圈一样膨胀起来，比如哑铃星云，我们看不见真正重要的东西。真正重要的东西，是隐藏在星云的面纱后面的过程，是暗自发生在黄缘蛱蝶胶质的蛹里面的事情。蛱蝶的蛹就是一座圣城，由金色的芦苇包围。圣城的第一层地基是玉石，第二层是蓝宝石，第三层是玛瑙，第四层是翡翠，第五层是红条纹玛瑙，第六层是红玉髓，第七层是橄榄石，第八层是绿宝石，第九层是黄玉，第十层是绿玉髓，第十一层是红锆石，第十二层是紫晶。蝴蝶翩翩滑入圣城，换下了自己的斗篷。它的蝶蛹是黄金。它就是星尘。

9　脚下红尘滚滚的平原

一个晴朗的秋日，我带领一队握着野花的学生从莫拉·泰瑞尔的植物课堂走到他们的实验室。我知道他们要在那里做什么。他们会打开布里顿和布朗所著的《新植物图志》。他们会在显微镜的照明台上打开带去的花束。他们会轻点花蕊和萼片，检查花冠的颜色，打开子房的缝隙。他们会素描植物的形态。这些花是属于穗状花序、总状花序、圆锥花序、伞形花序、伞房花序，还是聚伞花序？这些叶子是深裂的、浅裂的、齿状的，还是完整的？它们是对生的、互生的，还是掌形的？叶柄是有茎的、无茎的、抱茎的，还是贯穿的？就在学生们爬上小山走向实验室的时候，他们仍抓紧时间从路边采摘更多的植物——菊苣、紫菀和假黄精。我小心地跟着他们，不免心生羡慕。

博物学家约翰·缪尔说，他生命中所经历的两次最伟大的时刻，分别是他和拉尔夫·沃尔多·爱默生[18]在约塞米蒂国家公园露营的时候，以及他独自在加拿大的沼泽中找到稀有的布袋兰的时候。我第一次来新英格兰是20年前，布袋兰的近亲，粉色的兜兰似乎也是稀有物种。记得我第一次遇到它，是在树林深处的水塘边上。我从来没在树林里见过这样的植物：绚丽、沉重，充满热带气息，就像温室的逃犯。我被它迷住了。我坐在它旁边的草地上，想弄明白这株植物为什么令我心潮澎湃。

我后来才知道，兜兰并没有我想象中那么稀有。在我对这片土地有了更多了解的时候，我学会了该去什么地方找到它们。毕竟在那些日子里，我在树林里偶然遇到兜兰，虽然不能和与爱默生一起露营这样的重要经历相提并论，但这曾经对我来说也一样是值得回忆的体验。现在，20年之后，兜兰在这一带已经变得非常常见。6月初，只要走进森林，就不断有生机勃勃的植物从你脚下冒出来。夏天里的绿色没什么可稀罕的，梭罗说。在现在的新环境中，兜兰就如同一袋硬币中的单独一枚一样毫不起眼。我们当地的大部分野花，都和夏天里的绿色一样没什么价值。山芥、秋麒麟草、紫菀、烟管头草，它们总是数量惊人。但这里也有一些野生植物特别稀有，足以让我为它们驻足。我曾经发现过一株孤独的耧斗菜，在那之后我再也没有见过第二株。我只知道一两个地方生长着这种高贵的鲜红色花朵。在断断续续的小河河床上，这种小花躲避着采集者的眼睛。去年，我找到了一种可能是从其他星球坠落在地球上的生命：一株白色的兜兰，雪白无瑕，独自在松树林中绽放，周围众星拱月般围绕着上万株它的粉色表亲。

我的彼得森野外花卉手册承认白色兜兰相当稀有，而且是一种本土花卉。相当稀有！本土花卉！这种独一无二的白色小花，是被选中的新娘，是神圣的羔羊。布里顿和布朗的书上提到的任何情况都没能让我为

这个令人兴奋战栗的发现做好准备。这个季节，我回到同一个地方，白色的兜兰再次出现在我眼前，在树林下的荒草中，在上万株的粉色兜兰身边，奇迹般地复活了。在新几内亚的某些部落的语言中，只有两个基础的表示颜色的词语，粗略地翻译过来的意思大概就是“黑”和“白”。有这样两个词就足够了。我的兜兰是白色的。宇宙中的其余部分都是黑色的。星系和恒星被创造出来，孕育了这棵小小的植物。恒星燃烧，锻造出原子。14世纪的神学家埃克哈特大师这样写道：

“大地不能逃离天空，

让它上下躲闪，

天空流进，使它丰饶，不求回报。

神也这样对待世人，

要逃离的只会回到他的胸怀。”

※

在我们的地球表面，现在至少存在300万甚至1000万个物种。历史上曾经存在的物种数量比这个数字还要大得多，但它们大都已经灭绝了。在一颗称得上是穷乡僻壤的恒星附近的一颗小小行星上，能存在这么多物种算得上硕果累累了。除此之外，对宇宙与地球的生物多样性相匹配方面的知识我们还一无所知。物理学家发现了几十种基本粒子和92种自然存在的元素。天文学家将少于20种类别的星系进行系统编目，恒星被细分为不超过100种类型。而在这个起伏、颠簸、悸动的地球表面，却存在着1000万种各自独立、可供分辨的生命形式。根本没有足够多活着的生物学家来解释这一切。植物学家的理论可以对白色兜兰进行更精确的分类：植物界，被子植物门，单子叶植物纲，兰目，兰科，兜兰属，兜兰种。但即使是如此细致的划分也不够好，这种冗长枯燥的植物分类术语，也可以应用于更常见的粉色兜兰。那么如此躁动的宇宙又是什么类型呢？当成千上万的粉色兜兰不断占据更多的地盘，什么样的宇宙还会为一株孤零零的白色兜兰留出一席之地？这个问题太过庞大了，可能是我们将要提出的最宏大的问题。

宇宙学家和物理学家越来越频繁地思考着相同的问题，他们也确实有理由这样做。因为我们对自己生活的这个独一无二的宇宙了解得越多，就越会觉得我们生存在这里是那么不可思议。考虑一下这些巧合：如果决定了原子直接的相互作用的所谓的宇宙精细常数的数值和现在的已知结果略有不同，那么恒星要么会燃烧得过于迅速，要么根本不会燃烧，永远保持寒冷和黑暗。这个常数的数值处在精确的平衡中，就像一枚立在桌子上的硬币一样，使相当数量的恒星能以稳定的光线燃烧几十亿年，从而温暖和滋养邻近行星上的生命，其中就包括我们的太阳。如果控制核力的强相互作用常数与现在相比仅增大2%，夸克就不可能组合

形成质子，也就不会存在我们熟知的那些元素。如果这个常数的数值比现在小百分之几，那么比氦元素更重的那些元素的核心都会不稳定，由岩石和铁组成的行星就都不会形成，碳基生物也无法存在。如果引力常数与其观测值略有出入，或增或减，恒星就不能散发出持续时间足够长的光来推进附近行星上的生命进化。如果大爆炸之后的1秒钟内，宇宙密度及其膨胀速率的比值与我们假设的值有极细微的差异，比如仅仅是小数点后面15个零再写一个1的差值，那么宇宙就会迅速塌缩，或者急剧膨胀，原初的物质就无法凝缩成恒星和星系。

我的白色兜兰显然存在，这一事实严重限制了物理学基本常数的取值。除非决定自然定律的常数具有某些特别精确且显然无端的数值，否则这棵植物不会存在于你我的视野里。恒星闪耀的事实，也许只是从可能存在的无穷多个想象中的宇宙中选择出了我们现实中的这个。硬币被抛到空中，用它的边缘立在桌上。如同你我一样，宇宙学家对此也感到困惑。他们把这种看似不可能的宇宙巧合，归结为一种原理，即所谓的“人择宇宙学原理”。这个原理指出，既然只有人类可以观测到的这个宇宙具备这些巧合的物理量，允许生命的出现和进化，那么我们生活的这个宇宙就必然具备这些物理特质。物理学常数的巧合就是为了我们的利益而奇迹般设计出来的，因为是我们在这里观测它们，否则它们就不会是这样。

布莱克说，一沙一世界，一花一天堂。他是对的。沙粒中的硅和氧，花朵中的碳，它们各自能存在靠的是将宇宙结合在一起的精确作用力。在恒星的中心，3个氦原子相结合就会形成碳元素。稍稍调整电磁力或核力的强度，就能从碳原子的核心中敲出不一致的共振，阻止氦元素的合成，在恒星燃烧的10亿年里也就不可能产生足够的硅和氧，以至无法制造出任何一粒沙子。不，硬币不会在落下时恰巧靠它的边缘立住，情况要比这不可思议得多：硬币在空气中翻转了1015次，却在落下来试图以边缘立住的时候一次成功。如果地球上所有沙滩上的每一粒沙都是可能的宇宙，即宇宙始终遵循着我们所了解的物理定律，那么其中只有一粒沙子是允许智慧生命存在的宇宙，只有一粒沙子是我们所生活的宇宙。

有人会为这些信息欢呼雀跃，他们会说：“啊哈！你看，物理学家已经证明了上帝的存在。”我要说：“没有的事。”物理学家什么都没有证明。他们只是观测到了这个极不可能存在的宇宙的存在，这是我们唯一能观测到的宇宙。如果这是一个使我们受到束缚的谜团，那就如此吧。如果你愿意，我会用来自祖先的古老语言来赞美这种不可能性，我会敲锣打鼓制造出欢乐的声音，我会奉献松树林中的白色花朵作为圣洁祭品。但是，我永远也不会相信在这种古老的语言中包含着关于无限宇宙的新的知识。物理学家所发现的事实，与沙石上的隐修者和菩提树下的佛陀心中的神秘同样辉煌、同样绝妙。物理学家已经掌握的知识丰富并深化了这些庄严尊贵的神秘，并非对其证明，也非将其否认。

※

第一眼看上去，宇宙的确就像是完全被设计成为了符合我们的利益而存在。但还有另一种方式看待宇宙。一位量子物理学家，当他将研究重点转向关于宇宙大爆炸的物理学理论时告诉我们，那些方程式允许多重宇宙的存在，在某种超空间和超时间的软木塞子拔出之后，就像冒出的泡泡一样，无穷多个宇宙喷薄而出，每个宇宙中的物理常数和条件都随机取值。我们已知的这个宇宙，这个沙砾和白色花朵的宇宙，是唯一一种允许形成我们这类物质和我们这类恒星的宇宙。这是连续扔1015次硬币才能获得一次的机会，我们的夜晚就是1015个夜晚中的一个。有些宇宙填满了恒星，有些永远黑暗，除了这一个，其他的宇宙我们永远都无法了解。你看艾伦·麦克罗伯特在《天空和望远镜》杂志上写下的段落：

50年后，经历过星系初生的大爆炸的宇宙，看起来似乎收缩了一点，显得拥挤。我们似乎正在接近下一个步骤。我们今天仅仅是试图透过一扇敞开的门勘探无边无际的宇宙全貌，或大或小，或熟悉或陌生，数不清的绚烂缤纷。我们所面临的实际问题是，我们没有完全合适的物理学。只能说，这是一种象征，意味着我们此刻正站在科学的前沿，未来一代又一代人会继续扩展我们探索的边界，会得到我们意想不到的结果。

我该怎么理解这件事呢？宇宙是巨大的香槟酒嗞嗞喷涌的气泡！我可能永远也不会习惯接受这件事。一个星光灿烂的夜晚就足以让我头晕目眩。一朵白色的兰花就可以让我屏住呼吸。如果上帝真实存在，如果包含星系的宇宙只是一朵太空泡沫，我该说些什么？夜晚，我的兜兰甚至也成了黑色。我是黑暗的朝圣者。就像诗人罗特克所说："我俯视着远处的光芒，我注视着树的黑暗一面，脚下红尘滚滚的平原，再看一眼，我就迷失在夜晚。"[19]


※

今天的报纸上说，哥伦比亚号航天飞机将于下午4点47分经过我们这片区域，也就是在太阳刚落下的时候。4点45分，我走进院子，想试着在天空中找到点什么。航天飞机严格执行了时刻表，出现在天空的西北方向，像外科手术的解剖刀一样精确地划到东方。它像金星一样明亮，看起来就像一颗在古老轨道上松散移过的行星。当我沉默地站在院子里观看遥远的飞行器把天空割出一个清晰的切口时，突然间夜幕降临，鸟群飞舞。一大群加拿大雁从水塘往我房子的北面飞，然后盘旋向南，喧嚣着打破了黄昏的宁静。它们唰唰地拍打着翅膀，有节奏地敲击着夜空，用它们的嘶哑嗓音嘲笑着天空中的群星。40或者50只加拿大雁，排成参差不齐的"V"字形队列，维持在我头顶上方不足30米的距离。它们拍打着、鸣叫着，在惹人烦躁的聒噪声中飞向南方，发出的噪声已经倾覆了杰里科的河床。我从来没想过去看看航天飞机究竟会从视线里的哪个位置出现。

地球表面随着生命流动。我注意到的所有地方都有生命的印记。我

睁开双眼，夜空遍布鸟群。我放任听觉，翅膀的拍打声在我耳畔鼓动。这是怎样的肆意挥霍？在我的书架上有一本马古利斯和施瓦兹编著的《地球生命门类指南》，270页的著作为所有的生命大胆地进行了分类。你和我、野生加拿大雁以及其他所有长了脑子和脊椎的动物，45000种，在这本书上只占据4页纸的篇幅——第236至239页。而兜兰和其他所有开花植物，23万种，只有3页内容——第268至270页。我真没想到，这本书上我认识的物种就没有几个。太多的生命太过渺小，不用显微镜根本看不见。还有很多生物的栖息地我从来都没有去过。我翻开一块石头，1000只动物慌忙逃窜到我的视野之外。我抓挠一下眼皮，就搅动得一个螨虫王国不得安宁。我每走一步路，都颠覆了一片微观世界的森林。我随意翻开这本书，看到第218页上面写的是：缓步动物门，缓慢移动，微粒尺寸的“水熊虫”。这里还给出了一幅电子显微镜制作的缓步类动物的照片，让人们可以理解为什么赫胥黎称这种动物叫“熊”。它们看起来就像熊，运动起来也像熊，只不过体积只是真正的熊的万分之一。缓步类动物可以在高至150摄氏度、低至零下270摄氏度的环境里存活。它们生活在北极，在热带地区，在蕨类植物的森林里，在温泉里。它们能自行脱水烘干，把自己变成桶状，这个行为被称为“桶化”，因为这时它们看起来就像葡萄酒桶一样。在这个状态下，它们能存活100年。它们可以承受住比足以杀死人类的辐射水平强大1000倍的辐射。这种生物的整个族群都是无法用肉眼看见的。它们用极细微的熊掌攀过地衣，它们把自己堆放在植物根部的黑暗酒窖里，假装自己是装着陈酿美酒的酒桶。如果事实真是如此，在这个吵闹的夜晚，在所有宇宙的合奏中，这些加拿大雁的扑腾吵嚷只是其中之一，那么我是否应该感到惊讶？这太令人难以置信了，为了确保1个、2个或者100个物理参数的随机起伏能够正确地、精确地组合，产生一片松树林里有着一朵小白花的宇宙，大自然会创造出无数个宇宙。但是那么多个宇宙注定无法被看到，因为它们当中缺乏有认知能力的生物。如果地球上存在1000万个物种才能确保其中有一种生物具备认知能力，如果1000亿个星系的存在才能确保其中有1000个行星进化出生命，那么为什么不会有10万亿个宇宙同时存在？确实，为什么不呢！加拿大雁的拍打和鸣叫，在几个小时之后，依然扰乱着夜晚的安宁。

10　隐藏的物质

在8月英仙座流星雨的鼎盛之夜，我和儿子幕天席地而睡。那天夜里异常晴朗，我们远离了城市刺眼的灯光和恼人的阴霾。流星划破恒星闪烁的苍穹背景，看上去似乎夜色才是点缀。我们头上的银河，从北边的仙后座延伸到南边的人马座，连成一道拱形。它是昏暗的光河，是发光的帷幔，是黑色天鹅绒上点缀的钻石尘埃。时光流逝，恒星西垂，我们几乎能感觉到自己正在银河系的明亮旋涡中旋转。

对所有古代文明来说，银河，这条繁星之路，是一座桥梁、一条道路，或是一条河流。天文学家小罗伯特·伯纳姆[20]认为，这些形象紧密联系着人类的生活观念，是两个世界之间的旅途或巡游——“生活是一座桥，”禅宗大师说，“在它上面没有房子。”——宇宙自身无尽的旅程通往未知的终点。这种形象是一种有力而难忘的象征，仿佛让我们踏上了一段漫长的旅程，让我们感到身处群星之间就如同回到了家。

对银河的现代观点也同样令人难忘。我们的太阳是盘状结构上数千亿颗恒星中的一颗。这个圆盘有着10万光年的直径。盘上的恒星聚集在几条旋涡状的旋臂上，围绕着中心旋转，就像一架风车。太阳距离这个中心3万光年，处在与太阳距中心同等距离位置的恒星，围绕银河系的中心转动一圈，需要2亿5000万年。恒星和恒星之间的空间撒满了尘埃和气体，它们是恒星诞生所需要的丰富材料。在银河盘的上下方分散着几十个由数百万恒星组成的球状集团，被称为“球状星团”。球状星团围绕着银河系运动，就像蜜蜂围绕蜂巢嗡嗡飞舞。

我过去经常在教室的地面上把一盒盐撒成旋涡状的样子，来建造一个银河系的模型。示范的效果很棒，给人留下了深刻的印象，但尺寸规模却是错误的。如果每粒盐都精确地代表一颗典型的恒星，那么盐粒和盐粒之间的距离应该有几千米远。一个数字和维度上相对精确的银河系模型需要耗费1万盒盐来撒在比地球截面更大的扁平圆圈上。在银河系的尺度上，我们的太阳系就只是风车中的一粒微尘，只是海水中旋转漂浮的一粒盐。就在那个夜晚，在那个我们看到了星尘的夜晚，我和儿子躺在敞开的夜空之下凝视着成千上万颗星。那是最棒的一个晚上。但我们所看到的全部的恒星都只是银河系中的一只旋臂上离我们最近的邻居。

夏天夜晚的银河在人马座方向最为明亮壮观。这一点暗示了那个方向是银河系的螺旋中心，聚集的恒星和星团最为密集。在银河系盘的中心平面上，尘埃和气体遮挡了我们的视线，藏匿着它的核心。但是射电和X射线望远镜可以穿透遮挡物，洞察强大的能量源，看到那个蓬勃跳

动的怪物的心脏，俨然就是造物之初的暴虐景象。银河系的核心，就是超大尺度的不稳定地带，是宇宙承受痉挛的地方。或许也是在那里，正有无数个太阳被超大质量黑洞吞噬着。

※

1610年的冬天，当伽利略把他的望远镜指向银河的时候，他惊讶地发现这条苍白的光带可以被分解为大量的恒星。恒星不计其数，超过了肉眼的视力范围。我们将银河系盘上无数恒星的光汇集起来组成的光带看作环绕在我们天球上的明亮天河。不透明的尘埃和气体在盘的中心部分聚集，特别是在人马座的方向，阻挡了天河的流淌，留下黑暗的岛屿。古时候没有明亮的灯光，居住在更南纬度（靠近人马座的纬度）的人，更容易看到这条横亘夜空的璀璨光带。澳大利亚原住民看到过银河系中心黑暗区域中巨大的鸸鹋形象。我们现在称这个黑暗的深渊为煤袋星云，真是缺乏诗意。在秘鲁，说克丘亚语的印第安人发现在银河的间隙中存在几个暗星座，包括一只鸟、一只狐狸、一头小美洲驼、一只蟾蜍，还有一条巨蛇。西班牙征服者忽视了印加人描述的黑暗的星座形象，恒星暗淡的枯燥夜空没有引起欧洲人的兴趣，他们没心思考虑那到底是什么星座。欧洲人看到的是破碎的光线，印第安人看到的是有限的黑暗。欧洲人看到的银河是条道路，印第安人看到的却是藏匿着野兽的巢穴。

现在，印加人的黑暗野兽去而复返，企图在我们身边作祟。近年来，天文学家已经发现了之前银河系一直在我们面前遮掩不表的更大的那部分，就隐藏在印加人闪耀的小美洲驼和蟾蜍之间的黑暗区域里。

对氢原子的射电研究表明，银河系的银盘尺寸比我们认为的还要大一倍。氢云扩展到活跃的恒星形成区之外，在恒星组成的明亮星系的边缘围绕着气体组成的旋臂。四条海星触手般的旋臂伸展到星系空间中，使旋涡规模加倍。那里的物质太过稀薄，难以孕育新的恒星。

能证明银河系正在进行特殊延伸的另一项证据，来自简单的数星星的办法。现在，相片底片上的恒星可以利用计算机控制的扫描光束进行计数。这些新技术能让天文学家观测到比之前的可靠测定范围暗得多的恒星。他们发现在银河系的光盘上下覆盖着大量的低亮度的恒星，而过去这些地方被认为没有物质存在。银河系的旋臂显然被一个由暗星组成的蛋形光晕包裹着。

但是在对银河系的研究中，最令人吃惊的进展当数银河系的旋转动力学。对银河系外围部分的天体（亮星、恒星星团和分子气体云）的运动观测，已经可以使天文学家改进他们对银河系总质量的计算。这些天体的轨道运动遭受引力的控制，它们被引力束缚在围绕银河系中心的轨道上。所有位于这些天体和银河系中心之间的物质都提供了牵引它们的引力。通过观测这些遥远天体的移动速度，天文学家可以计算出束缚它们的总质量。这些计算的结果令人惊讶。它揭示出，银河系的质量至少

比过去估计的高出30倍，不发光的物质只能通过它们自身的引力被人察觉。

怎么会有这么多的物质？银河系中97%的物质到现在都没有被探测到，它们就隐藏在黑暗中，就像印加人的星座避开了西班牙殖民者的注意。答案在于，这些新近发现的物质中一定包含着某些特殊的非辐射物质形式。所以它们不会是星星，我们可以看到星星在空中闪耀。它们也不会是星际气体或尘埃，气体和尘埃自身散播辐射，也会吸收来自遥远光源的光线，我们可以借此观测到它们。

那么，这种宇宙中隐藏的成分，这种占据全部物质构成的较大比例的暗物质，究竟是什么？它们是什么时候形成的？我曾经和一位朋友提到这些研究的进展。“宇宙中97%的物质，”我说，“是我们完全不了解的存在。”我的朋友回答：“也可能是最好的存在。”事实是，天文学家至今对这种把恒星束缚在银河系轨道上的“东西”完全没有了解。

可能，银河系的暗物质成分包括木星尺寸的天体。氢和氦形成的球体太小，所以不能点燃成为恒星。也可能暗物质中还包含一些我们仍不了解的天体类型，它们比尘埃的颗粒大，比最小的恒星小。或许，暗物质中还包括黑洞，也就是坍缩成致密天体的恒星，连光线都无法逃离它们的引力。

这些更常见的暗物质候选体遍布我们的星系。探索亚原子领域的物理学家已经提出过“暗物质”可能具有其他的形式：它们可能是中微子的囤积物，因为每一个中微子自身都带有难以察觉的微小的质量；或者是一种尚未被发现的引力微子、光微子或轴子的气态形式。这些粒子的质量是电子的100亿分之一，完全是假设中的实体，过于古怪离奇，偏离常规经验，没有人能了解它们，它们就像祭司王约翰的现代王国里的朝圣者一样徘徊不定，在无限大和无限小的世界里游走。就像18世纪哲学家鲁杰尔·博斯科维奇所说的原子——没有维度的粒子，却有着无限的影响力——这些银河中稀奇古怪的野兽或许正以一根难以言喻的奇妙线绳和宇宙绑在一起，如此捉摸不透。想要理解它，只能凭借我们的想象力，去拥抱整个时间和空间的结构。“你能系住昴星的结吗？”上帝在旋风中回答约伯[21]，“你能解开参星的带吗？”

※

这种被我们像扔渔网一样笼在恒星身上的无限大和无限小的联姻，究竟是什么？是神的宏伟蓝图的直觉，还是我们缥缈梦境的投影？人们总能在银河中见到自己的梦境。对埃及人来说，银河是伊西斯播种的麦田；对因纽特人来说，银河是纯净积雪的瀑布；对布须曼人来说，银河是将熄营火的灰烬；对阿拉伯人来说，银河是奔腾不息的河流。

哈罗·沙普利[22]享年87岁。在他辞世前不久，曾到访我的学校。沙普利为我们建立了银河系的现代观念。他提出，银河系是千亿颗恒星组

成的旋涡状薄饼，直径10万光年，条纹上缠绕着或暗或明的气体带。《波士顿周日广告》在1921年5月29日那一期的头条写道：哈佛天文学家发现，宇宙比之前大了1000倍。在那次访问中，这位羸弱的八旬老人为我们讲述了有关他的生活的故事，以及故事背后的意义。他的双眼依然明亮，白发斜梳。他穿越了银河系，只留下身后我们这些茫茫的地球人还在翘首等待。

沙普利做了一个了不起的梦。他的梦里包含所有可见的恒星。他的梦将宇宙放大了1000倍。现在，我们已经发现，可见的恒星只是所有存在的物质中的一小部分。银河系中大部分物质对我们来说都是不可见的，它们躲在梦境边缘的黑暗中，束缚着、牵引着、塑造着、指引着——那隐藏在光海中巨大的海怪利维坦，或是长着铜管般骨头和铁板般软骨的骇人巨兽。如果在银河系中新发现的不发光物质在其他星系中也一样普遍（我们有理由这样相信），那么我们将不得不大幅增加对宇宙总质量的估计。根据广义相对论，正是宇宙的平均密度来决定宇宙是会永远膨胀，成为无尽的冰冷虚空，还是会重新收缩，恢复为创生时的炽热火球。银河系和其他星系中隐藏的物质可能会决定宇宙的最终命运。

※

在我和儿子观赏8月夜晚这场每年都会上演的流星雨的时候，我们所感知到的这一切，沿着银河流淌过我们的脊背。我们乘坐着旋转的地球围绕太阳运动。太阳裹挟在千亿颗恒星转动形成的旋风中，被神秘的暗物质封印其中。旋转，旋转，旋转，我们分享着一段连宇宙自身也不确定目的地的旅程。

11　水塘中的怪物

奥德修斯遭到了喀耳刻的警告。选这条路走，他将遭遇六头六口、每张嘴里都挤着密密麻麻三排尖牙的怪兽斯库拉。选另一条路走，他要通过每天吞吐海水三次、将大海搅出翻涌旋涡的海妖卡律布狄斯。大海像煮沸的大锅一样翻腾，她掀起滔天的巨浪，喷出的海雾犹如暴雨冲刷各个角落。当她吞咽咸海，整个旋涡从里到外都会被掀开，把海底的黑沙暴露在外。奥德修斯做出了他的选择。他驾船驶向斯库拉，在六头怪兽掳走他船上的六位勇士的时候，他发现自己已经幸运地趁着海怪休息的空当逃出生天。

18世纪卑尔根的蓬托皮丹主教在他的《挪威博物学》中这样描述：荷马笔下的斯库拉就是大海怪的意象。这样的考虑，减少了荷马故事中神话色彩的渲染，但古老的魔法依然能作用于主教大人的想象力，构思出宣告不祥的海洋巨怪。海怪的身躯如此宽阔庞大，蓬托皮丹主教坚称，当海怪在海面下穿行的时候，渔民会发现他们的渔船仿佛搁浅在一片不寻常的阴影浅滩上。这种生物起伏不定，它的身体裹满如同沼泽般浓厚的黏液，触角有船的桅杆那么长。如果海怪缠上最大的战舰，足以把它拉到海底。“怪物浮上海面短暂停留，”主教写道，“它开始再次缓慢下沉，随之而来的危险不比之前少，因为下沉的运动造成了海水涌起，如此而来的旋涡或激流能把一切物体拽向深渊。”

赫尔曼·梅尔维尔是一位有质疑精神的作家。他倾向于相信主教笔下怪物的灵感来自一只巨大的鱿鱼。在他的《白鲸》一书中，亚哈船长的“裴廓德号”上的捕鲸人遭遇了一只巨大的鱿鱼，却错把它当成了白鲸。以实玛利的报告令我们难忘：

我们简直顿时把有关大家伙的所有想法都给忘得干干净净，大家尽凝望着那神秘的海洋迄今为止所揭示于人类的最为奇妙的景象。一团巨大的软绵绵的浆状物，纵横有好几个弗隆[23]，闪着奶油色的光芒，漂浮在海面上。在它身体中央辐射出无数的长手臂，扭动卷曲，七缠八绕，活像一窝蟒蛇，横冲直撞地仿佛要把任何碰得到的倒霉东西捉住似的。既看不出它究竟有没有面目，又辨不清它是否有感观，但见一个神秘的、无定形的、凭空出现似的活幽灵在波涛间起伏。

水手们怕得发抖。除了以实玛利，所有人都在那天被卷入深渊，与怪物融为一体。

自古时候起，怪兽和旋涡就一直是神话和故事中的常驻角色。而且，正如你所期盼的那样，这些形象也被投射到了天空之上。猎户座的

脚部有一个巨大的旋涡，就在明亮的恒星参宿七附近，被神祇赫耳墨斯·特里斯墨吉斯忒斯称为“死亡”，而新西兰的毛利人称之为“通往地狱的路”。就在星座之间的这个位置，波江座的河水流淌着，星光如同法厄同的水中坟墓，倾泻而下，一直到达南方地平线以下的世界。靠近河流的是鲸鱼座。这只鲸鱼，就是《白鲸》的主角在天空中的样子。古代神话中，波江座代表的大河与银河代表的天河经常被混淆。它们都是连接生者世界与亡者世界的通道，都有怪物驻守，都被说成是承受了法厄同的坠落的河流。在银河的例子中，科学和神话进行了奇妙的融合，我们已经发现，天上明亮的河流实际上是旋涡状的结构，而在那大旋涡的深处，如同古人猜测的那样，潜伏着恐怖的怪兽。

※

天文学家早已知道，银河系的中心是灾难的策源地。这个星系核处于人马座的方向，人马座伴随着高能辐射的火花而燃烧：射电能量、X射线能量和紫外线能量。半个世纪以前，一位名叫卡尔·央斯基的年轻工程师建造了一架旋转的无线电天线，用来研究雷暴对短波通信的影响。他的天线探测到一些静电来自附近的和远方的风暴，还有一些信号源稳定且微弱，每天围绕我们的地平线完整旋转一圈。经过几年的持续观察，央斯基得出结论，这个微弱的无线电静电源位于人马座方向，比地球上的任何风暴都更遥远。它被固定在恒星间的空间中，远离自转着的地球。央斯基的天线是人类史上第一台射电望远镜。他对人马座无线电静电射电源的观测是射电天文学的开端。之后，更先进的射电望远镜被用来绘制银河系的旋臂图案。旋臂由恒星、尘埃和气体组成，因为其中的氢原子而活跃于微波波段。那些同样类型的射电望远镜窥探到了银河系的核心，那一定是个强大的射电辐射源。而辐射最强烈的核心，就位于旋臂的最中心处，被称为“人马座A*”。射电源隐藏在遮挡物中，一般的光学望远镜无法透过银河系旋臂上的尘埃和气体观测到它，但来自银河系中心的射电波可以轻松穿透这些障碍，就如同本地的调频广播信号穿过我家墙壁一样容易。以每秒数百万次的频率，栖身于旋涡星系核心的怪兽宣告着自己的存在。

最详细的银河系中心射电图是由甚大阵（VLA）射电望远镜制出的。VLA位于美国新墨西哥州靠近索科罗的沙漠中，由27面天线组成，排列成“Y”字形，范围延及方圆30千米。射电图像显示，三条S形的高热、带电气体正绕着银河系中心旋转。天文学家现在相信，这些强力的射电源是流入中央大质量黑洞的物质。黑洞是一种极其致密的天体，即使是光也不能逃离它的引力。银河系中心的黑洞质量相当于1亿个太阳的质量，却被压缩在比地球轨道还小的空间里。显然，银河系中心的黑洞还在持续增长，轻而易举地把恒星、尘埃和气体拉扯进它的势力范围。奥德修斯做梦也想不到比银河系中心的怪物更离奇的东西。致密黑暗的物质核心，超出我们的想象，正在吞食恒星，为自己果腹。

※

1983年秋季的一天，我走过本地的木板桥，那之下的溪流渐宽，拓成一处宽阔的暗色水塘。我经过一群年轻的垂钓者，他们正在往远处的水塘角落里释放钓线，脸上带着12岁男孩子青涩的自信。我停下来称赞他们熟练的技巧，也哀叹这里鱼儿的命运，而几个瘦小的年轻人只是面无表情、默不作声地站在桥面上。“钓得怎么样？”我问。他们脸上闪现出一瞬严肃的神情。他们忙于工作，而我打扰了他们。“这附近有一条40厘米长的鲈鱼。”其中一个男孩边说边把渔线往池塘的另一边放出去。我明白了。男孩们接连把鱼饵扔进可能隐藏着大鱼的阴影里。我往水里使劲盯着看，但除了黑色的池水什么也没看见。

每天下午我下班回家，都能在桥上看见这些男孩。每天下午我询问他们的时候，都会得到同样的答案：“大鱼还在那儿。”我佩服这些孩子的耐心与执着，但我更佩服的，是水里那个我还未曾谋面的带鳞生物。就像尼斯湖水怪或峡湾的海妖，大鲈鱼给水塘——甚至世界——增添了新的魅力。

每个黑黢黢的水塘里都应该有它自己的怪物。夜空的“水塘”也曾庇护着依附于它的各种怪兽：鲸鱼座、天龙座、天蝎座和长蛇座仍潜伏其中。几代人以来，我们一直在忙着除掉那些最后的、存在于谎言之下使人轻信的黑暗造物，比如匿身于挪威海域虚假阴影中的海妖。现代的主教不会再像18世纪卑尔根主教对鱿鱼的描述那样，写下混合了客观科学与道德预警的文字。蓬托皮丹主教当年说，海妖花几个月吃东西，再花几个月排出粪便。在它排便的那几个月里，海平面总是污秽混浊。这些漂浮的排泄物的气味会吸引来鱼类。渔民如果这时赶来捕鱼，海怪就会张开触手，用密齿尖牙欢迎来访的宾客。

地球和天空中的黑暗池塘逐渐无法再庇护那些怪物，它们一只接一只地被科学这位猎魔人残忍捕杀。但是现在，伴随着一次令人好奇的回归，科学又给我们带回了天空中的怪物，比我们在梦中见过的任何一只都更加奇怪。银河系，黑夜中的旋涡池塘，在它的核心住着一只怪兽。在那可怕的涡流中，恒星和行星，气体和尘埃，都会被它的血盆大口吞下，被引力卷入一个幽暗深邃、无法逃离的地下世界，而后消失殆尽。就像池底的大鲈鱼，银河系心脏里的怪物让夜晚变得更加深沉阴暗。它对着星座念出咒语，施展魔法。

※

如果我们想了解银河系，最好的办法通常是看一看别的星系。我们无法看见银河系的全貌，因为我们身在其中。但如果我们超越银河系的扁平旋涡放开视野探寻，就能发现无数其他的星系，并且没有理由认为这些星系和我们自己的不同。我们知道，银河系的中心能产生巨大的能量，它是神秘离奇事件的发生地。能量的来源，据天文学家所说，是隐藏在恒星旋涡池塘中的大质量黑洞，就像淹没在旋涡里的海妖。我们的星系中心存在黑洞的最佳证据，来自银河系之外，来自位于猎犬座的名叫NGC 4151的星系。

NGC 4151是最明亮的塞弗特星系之一，这种稀少的高能星系类型于1943年被卡尔·塞弗特首次发现。天文学家们相信，塞弗特星系和遥远神秘的明亮类星体有关，至少这些奇怪的星系明亮的中心区域产生能量的机制和类星体相同。现在看起来，塞弗特星系中心的发动机，以及类星体的中心，很可能就是相当于太阳数亿倍质量的黑洞。那样的天体位于星系的中心，会吸引并吞食邻近的恒星、尘埃和气体。千百万个太阳，以及可能围绕它们运行的那些行星，都会旋转着被淹没在那个令人恐怖的水槽里，就像船只和水手掉进卡律布狄斯的口中。在劫难逃的那些太阳系和伴随着它们的气体云都被吸进旋涡，在其中被纺成一个扁平的“吸积盘”，一个由恒星、尘埃、气体组成的旋转环，在炽热的辐射能量下堆积、加热、流动，在落入黑洞的深渊之前绝望地挣扎。

一个由欧洲天文学家组成的团队已经获得了NGC 4151中心存在黑洞的有力证据。利用地球轨道卫星上的紫外望远镜，他们发现这个星系活跃的核心所散发出的光芒中存在碳和镁元素的辐射。光的特征波长被模糊了，大概是物质围绕黑洞的运动所造成的。从模糊的程度来看，这个团队能够计算出含有碳和镁的气体云的轨道运行速度。

在1979年的一系列观测中，NGC 4151的核心陡然耀发了。13天之后，碳的光芒耀发，这表明明亮的碳云距离旋转中心有着13天的距离。30天之后，镁光耀发，即富含镁元素的气体云距离旋转中心有30天路程。在已知距离和物质云的环绕速度的条件下，天文学家发现很容易就能计算出中心天体的尺寸和质量。在NGC 4151的中心，有一个比单个恒星大不了太多的天体，其质量相当于1亿个太阳。毫无疑问，具有这样的尺寸和质量的天体一定是黑洞。1亿个太阳，也许是1亿个和我们自己的太阳系类似的行星系统，已经打着旋儿落入宇宙的下水道。就像女巫喀耳刻警告的那样：“上天让你远离那个地带，因为就连能撼动大地的至尊天神也不能把你从灾难中拯救出来。”

※

托尔金，中土世界的大师，他认为魔法和怪物的世界只是形容词的另一种视角。能思考出“轻”“重”“灰”“黄”“静止”“转动”这样的概念的思想，也能构思出让重物起飞、让铅变成黄金、让石头变成流水的魔法。相反地，20世纪的世界总体上来说是一个名词和动词的世界，是物体在时空中运动的世界，是缺少魔法的世界。我们所见即所得。

除了……在那个时候每天下午那些男孩都去垂钓的水塘里。从形容词中，我让我的思想虚构出巢穴里的大鲈鱼。它轻盈如悬浮水中的云，或是光滑如匍匐水底的卵石。它躲藏在梭鱼草灰色的阴影中，或是像折射的阳光映出亮黄色的光芒。它如同水中的月亮倒影静止无息，或是像水塘釉色表面上的陀螺旋转不停。形容词是想象力的造物。

距离太阳30000光年远，在银河系螺旋的中心，巨大的黑洞正一刻不停地忙着自己的事情。沉重、黑暗、静止的引力奇点坐落在黑暗的核

心，吞食着光线、黄色的恒星、摇摆的天体。即便是容易轻信的蓬托皮丹主教也无法想象出这样的造物，1亿颗恒星被压缩成一个相当于地球轨道尺寸的球体。不，这是地球轨道尺寸的黑洞，空间体积永远被引力所掩盖。恒星，数亿颗恒星被挤压进地球尺寸的黑洞，棒球尺寸的黑洞，针尖尺寸的黑洞。密度终极无限，无法抗拒，最终创造出能将任何物质拉扯进无尽虚空的旋涡与激流。黑洞，白鲸，水塘中的怪物：想象永远不会离去。在梅尔维尔的道德寓言的恐怖结论中，大白鲸把整个宇宙都拉进如墨般漆黑的深渊。

立刻，惊呆的船员就站立起来，然后转身。“船呢？我的天哪，船在哪儿？”很快，他们通过昏暗的、迷蒙的雾气，看见她的褪色幻影，就像气态的海市蜃楼。只有桅杆的最上头一截露出水面。几个原本在高处的水手，现在正保持着一种安详的姿态往下沉。一个巨大的、以小船为圆心的旋涡形成了。仅存的一只小艇，所有的漂浮物，每一片浮桨，所有有生命的和没有生命的，都被卷挟其中。最终，所有的一切都被旋涡带走了，甚至连“裴廓德号”留下的肉眼不可见的细碎木渣也没能逃过一劫。

※

在温暖的秋夜，当银河系灰暗的环状光芒从仙后座一直绵延到人马座，我记得那只怪物就在这星系的核心。斯库拉和卡律布狄斯的魔法也没有物理学家的这个发现神奇，它的本质被射电天文学家用仪器设备揭示了出来：人马座A*，这个以太阳为食的黑洞，仍潜藏在夜晚的水塘里。

10月底，我终于在男孩们钓鱼的水塘里看见了那条大鲈鱼。我刚走到桥上的时候，它正好从一直晒太阳的睡莲附近猛冲出来。天气很冷，带着钓鱼竿的男孩们已经走了。轻的和重的，灰的和黄的，静止的和转动的。它又活过了一季。

12　夜晚的数字

“大多数人过着一种平静而绝望的生活。”梭罗说。如果他的书对我们有着持续的吸引力，那是因为我们正处在绝望中。在绝望中，我回到夜晚，就像梭罗回到他的湖边。我测量那些星际的空间，用的工具与这位康科德市的自然主义者测量瓦尔登湖用的绳索和棍棒一样。梭罗用铅垂线测量瓦尔登湖的深度，再把这些数据标在地图上。他搜寻生存在湖水里的鱼和水草，将其分类编目。他记录冬季里冰层的厚度。这些是他的资产账目的一部分，是对他的财富的记录，是对他从瓦尔登湖得到的财宝的清算。这些，如梭罗所说，测量、深度、厚度，是一个人真正的经济学。

黑夜就是我的湖水，我数着其中的星星。我可以看向窗外，在飞马座从现在开始升起1个小时之后，告诉你在这个星座的大四边形里我能看到多少颗星星。今夜我只能看见4颗。4颗，或者1颗也没有，或者20颗。或者在最棒的无月之夜，在这个大四边形中可以看见好多颗星——重要的是范围。飞马座的四边形在宇宙空间中圈出一个范围，围墙可能是数光年远的尺度或是彗星的尾迹。在梭罗的房子里能听得到康科德市的喧嚷，但他并不觉得拥挤。“这里已经有了一片足够大的牧场。”他说，运用他的想象力。瓦尔登湖对岸的矮橡树高原一直伸展到西部的大草原和鞑靼草场。他说，从他住的地方到康科德市的距离就像天文学家观测到的夜空那样遥远。他能想象出“仙后座的宝座”（我复述了他的原话）之外的那些罕至的迷人之地，但他发现，他在瓦尔登湖的房子出于位置的原因远离了城镇生活，就像仙后座群星远离了太阳。“那些闪闪的小光，那些柔美的光线，传给我最近的邻居，只有在没有月亮的夜间才能够看得到。”

今晚，我在飞马座四边形里只看见4颗星。而在整个夜空里随意散落着另外的400颗星。我占有了它们。我记录划过天空的流星；我测量星云的重量；我阻断银河，用它碾磨我的稻谷。我把夏天的群星像蔬菜一样装进罐头，以供我在冬天享用。我把冬天的群星折叠到阁楼的盒子里，让我在多云的夏季夜晚可以欣赏。我把繁星记录到账本里。我清点它们，就像一名会计或是出纳员。这就是经济学，这一切都值得。

※

梭罗对经济学特别感兴趣。他用会计师的心思做分类和测量。我们现在已经精确地知道了他建造房子所花费的成本：木板8美元3.5美分、瓦片4美元、木条1美元25美分。他花4美元买了1000块旧砖，花1美分买了粉笔。他的木屋的全部成本总计是28美元12.5美分，其中还有一部

分是他在极不情愿的情况下支出的。他需要的不多，最重要的是从他家门口往外望时可以看到的大自然。他说，自己就算坐在南瓜上，也要比挤在天鹅绒垫子里强。

我在某处读到过，卡拉哈里沙漠的布须曼人族群中平均每人拥有11千克重的物质财产。我计算了一下自己的物资，除了房子以外，我能清点的物品总重量超过了4吨。这是生活中积累的沉重负担。这4吨物资的获取和维护，就是我绝望的来源。梭罗说，生活中的大部分奢侈品，以及许多所谓的舒适，不仅是可有可无的，还会对我们的生活造成阻碍。我没有天鹅绒垫子，但在我房子周围的阻碍已经足够多了。这些东西从我身上索取的多于它们给予我的，我必须随时承担它们的重量，无论我是否愿意。

如果我必须把我的物资削减到11千克，我会留下什么？我首先想到的是我的自行车——油亮、漆黑、机械性能完美——它是一件珍贵的财产，当然也是一个中年人可接受的装备。但是合金材料打造的自行车有12千克重，那上面也没有什么我能卸下来的零件。此外，冬天就要来了，自行车不能带着我穿过白雪皑皑的森林。那么，立体声收音机和一些我最喜欢的唱片怎么样？肖邦的夜曲，或者马勒的第一交响曲？但是，我发现这些东西的重量有17千克，况且配备的还是耳机而不是喇叭，对电器的需求仍然让人与世界维持关联。好吧，那么，我应该保留我的写字台吗？漂亮的桌面给予我很多愉悦的时光，却不求什么回报。但在写字台上得到的乐趣，离不开能看到冬季阳光穿透绿色植被流泻而出的、具有海湾景观的窗口，以及总是在我手边的一杯香气弥漫的现煮咖啡。再加上这些额外的东西就远远超过11千克的限制了。那我该如何选择呢？一条灯芯绒的裤子、几件厚毛衣、一双好靴子、一顶羊毛帽子、一个空白页的本子、一支钢笔、奥特威尔的《天文年历》、伊恩·里德帕斯的《诺顿星图手册》和梭罗的《瓦尔登湖》。我把所有这些东西打包好，它们只有不到10千克重。这就够了。

梭罗的朋友爱默生曾说："谁能了解地上的糖果和美德，了解水、了解植物、了解天空，还了解这些东西从何而来，那么他就是一个真正富有的、高贵的人。"当然，把我对减少生活负担的渴望，与布须曼人因穷困而被迫缺乏物资的情况放在一起比较，有些不负责任。而且，说实话，在我4吨重的物件当中，几乎没有什么是我甘心舍弃的。我没办法回到卡拉哈里沙漠，我也不渴望那样。所以，我要在我的物资当中增加来自天空的糖果和美德。我要收集恒星和星系，直到我的资产堆叠不住，颠覆倾倒。我会贪得无厌，直到没有哪一座皇家金库大到能装得下我的财富。

※

当伽利略把他的望远镜指向巨蟹座的"蜂巢"的时候，他数出了36颗星。那时他的财富明显增加了。当他对着猎户座腰带上的3颗星看，他的财富累积又得到了激增。当他用仪器观测银河的时候，他收获的星星

不胜枚举。他在1610年1月的那几个寒冷的夜晚聚敛的财宝，连美第奇家族的金库都装不下。

对于伽利略的宝库，我将增加银河系的5000亿颗恒星，并且宣称它们归我所有。让我把这笔账记下来：500000000000颗恒星。我保守地估计，每颗恒星有6颗主要行星、几十颗卫星、1万颗小行星。那么，我有着5000000000000000个潜在的住宅用地，它们全都被我一人独占。室女座星团里的一个漂亮星系怎么样？室女座中有3000个可见的星系，经过天文学家仔细统计，每个星系都有着5000亿颗恒星。我可以优惠给你一个。

我犹豫不决，担心自己听起来就像埃克苏佩里笔下的小王子在328号小行星上遇到的那位商人，那位拥有星星的商人，或许也只是他自认为拥有了它们。他把自己所拥有的星星全都记录在纸上，准确地说，一共有501622731颗。在埃克苏佩里的刻画中，这位商人只是被我们嘲笑的对象，他痴迷于积累无用的财富。但我要说，有这么一本记满恒星的账本并非坏事。这比堆满天鹅绒靠垫的豪宅还要好。

小王子生活在一颗比房子大不了多少的行星上，上面有三座火山（两座活火山和一座死火山）、一枝玫瑰花，还有一些总重量肯定到不了11千克的财产。我很羡慕小王子那颗行星的尺寸。在同一天晚上，他只要挪挪椅子，就可以看到44次日落。可以看到44次日落的夜晚绝对值得拥有。我只曾在一个晚上看到3次日落，可那次经历已经让我感觉自己是个富有的人。第一次日落时，我坐在波士顿洛根机场准备起飞的飞机上。当飞机升到空中向北飞行，我瞥见太阳重新出现在地平线上，趁机目睹了第二次日落。飞机转向西边，追赶落日，我又看到已落下的太阳再次升起，垂在地平线上。飞机掉头向南飞向纽约，太阳第三次西沉。我在自己的账本上记录了这三次日落。

账本上还记录着另外一些珍贵的财富：1975年秋天天鹅座出现的一颗新星；1961年9月30日见到的无与伦比的极光；如同一道蛾眉的初生不过30个小时的新月；在粉蓝色黄昏里拖着尾巴划过天际的美丽威斯特彗星。我的账本里还包括关于日月食、掩星、星体相合、火流星的记录页。我贪婪地收集这些天象，把它们囤积起来。我还想收集其他宝藏，却没能如愿。许多年前，我在《科学美国人》上读到一篇关于绿光现象的文章，那是指太阳升起或落下的时候，太阳的上边缘出现的由大气折射而导致的一抹转瞬即逝的彩色条纹。要看见这种现象，需要一个完全平坦开阔的视野、清晰明朗的地平线以及足够好的运气。我不知道除了那篇文章的作者之外还有谁看见过绿光。但我经常去寻找它。每次在我发现自己身处海平面附近而且天气非常晴朗的时候，我都期盼着能有幸目睹绿光。但我至今还没能见过它一次。

※

有一天，我在学校走廊里遇到了一位朋友。我们手上都拿着一本大

书：她拿着一本伊丽莎白时代的诗歌选集，而我手里是一卷《史密森星表》。“哦！星星！”她说道，“真好！”我翻开我的书，上面密密麻麻全是数字。纽约城市电话本那么大的一本书上，详细记录着96000颗恒星的坐标和特征，包括赤经、赤纬、自行、视向速度、光谱型、视星等和绝对星等、以秒差距为单位的距离。这位朋友明亮的双眼暗淡下去，她引用了诗人约翰·多恩的话：“悲伤的数量不能如此之多。”[24]

我这本《史密森星表》中的恒星，并不像我那位朋友渴望找到的那样闪耀夺目。它们不是小王子送给他的飞行员朋友的星，不是会像小铃铛和生锈的滑轮那样歌唱的星。诗人们会蔑视那位为星星编号的商人，他们更愿意接受闪耀着金属光泽的未经测量的夜空。他们更喜欢看到夜晚的星光仿佛大教堂里燃烧的蜡烛一般闪烁。大教堂里的烛台的确梦幻，但没有写满数字的星表，我们就无法接近这个由星系组成的宇宙。没有数字，我们就依然活在以地球为中心的伊丽莎白时代。数字，是让我们打破第七层天球并且得以一窥无限宇宙的途径。

数字可以成为启示。16世纪犹太教神秘哲学文字《光明篇》告诉我们，《圣经》中的每一个字都闪着光芒。对应地球上70个国家的70种已知的语言，每个词语都有70个理解的角度，就连每个单词的每个单独的字母也是如此。在每个词的70个理解角度中，存在600000个真相的“入口”，或者说是可能的解释。西奈半岛的摩西在第一个词诞生的时候，作为600000个目击者之一对其进行了见证。这样算下来，在《圣经》的每个词中，就有2940000000种光芒。《圣经》中每一页纸上的光芒多如银河系中的恒星。据《光明篇》所言，整本《圣经》里的单词、字母甚至字母的形状，都揭示着上帝的秘密名讳。除非把宇宙撕裂，否则《圣经》中的任何一个字母都不能被替换或删去。

现代天文学与《光明篇》的精神紧密相连。星系就是单词，恒星就是组成它的字母。每颗恒星都有600000个入口，有些是数字，有些是生锈的滑轮奏出的乐音。如果不冒风险，哪一个都不能舍弃。半人马座α星距离我们4.3光年远，即40万亿千米。就算开采整个地球的石料也不够制作沿途里程碑所用。每一米的距离对于这趟旅程来说都是必需的。对这每一米路和每一颗星，清点它们，命名它们。诗篇的作者这样唱道：“他告诉我们群星的个数，他呼唤每颗星星的名字。”织女星、五车二、毕宿五、参宿四。但这些只是巨大的恒星。从离我们最近的那颗开始，把它们全部编号，按顺序进行清点。太阳，半人马座α星A、B和C，巴纳德星，沃尔夫359，勃兰德2147星，天狼星和它的白矮星伴星，鲁坦726-8恒星系统。

如果我也拥有一本像《光明篇》这样的著作，那一定是小罗伯特·伯纳姆的《天体手册》。共三卷2138页的纸张满满记载着恒星信息和知识。翻开任意一页，我都能发现通往无限宇宙的新入口。例如在第213页写道：“1918年发现的天鹰座新星，是过去300年来最亮的新星，因发现巴纳德星而成名的巴纳德在当年6月8日夜晚首先注意到它。在偶然注意到这颗新星的几个小时之前，他刚刚结束了在怀俄明州观测日食的工

作。同一时间，居住在俄亥俄州德尔弗斯的17岁少年莱斯利·珀尔帖也独立发现了这颗天鹰座的新星，他后来成为美国彗星的观测专家。在这颗新星被发现之后的几个小时内，它的亮度超过了除天狼星之外的所有恒星。天鹰座的这颗恒星距离我们1200光年远，其光度是太阳的44万倍。”再看第940页：“行星状星云NGC 2392，位于双子座，被威廉·赫歇尔于1787年发现。根据伯纳姆的描述，这个模糊的星云具有W.C.菲尔兹喜剧电影的特点——它的俗名叫作爱斯基摩星云，呈现出一张戴着爱斯基摩毛皮兜帽的人头的滑稽面孔。经过仔细测量得知，爱斯基摩星云正在以每秒110千米的速度增长。”第1619页：“在银河系的中心、人马座的位置，炽热的恒星燃烧生成甲醛、二氧化碳、羟基分子、甲醇等生命物质。如果将恒星星云人马座B2的乙醇成分进行提纯，可以得到无数瓶纯度极高的烈酒，这些酒的质量总和将大大超过地球。”

在关于人马座星云的这一页中，星座中的恒星数目以惊人的数字被统计展示出来。伯纳姆给我们传递了4世纪的中国隐士诗人陶渊明的精神。陶渊明发现社会化的生活对他的个人才智来说毫无价值，他不愿再为五斗米折腰，从而退居到他独自拥有的私人世界。在那里，他投身于自己真正热爱的事物：自然、花朵、儿童、星辰、诗歌、美酒和他那“三径五柳”、在夏夜可以看到银河悬于东篱之上的小花园。突然间，我们仿佛重返瓦尔登湖，或是回到小王子的小小行星之上。我们像教堂里的老鼠一样穷苦，又像王公贵族一样富有。我把人马座的每颗恒星数给我自己。我拥有它们而不必向任何人折腰。

13　颜色的甜言蜜语

雅内·马尔科姆在她的批判文集《黛安娜和尼康》（*Diana and Nikon*）中道出了黑白照片与彩色照片之间的差别。她说："黑白照片，要求摄影师屏蔽掉对色彩世界的注意，而彩色照片允许摄影师忘记色彩世界的存在。"当然，使用彩色胶片作为媒介的人中存在许多伟大的艺术家，但在传统上说，是否拒绝色彩可以作为区分严肃摄影师和摄影爱好者的标准。马尔科姆说，掌握黑白媒介很困难，而彩色的就容易多了。前者需要的是艺术，而后者就没有那么高的要求。在我写下这几行文字的时候，我窗外的树肆意张扬地展现着色彩。在10月的新英格兰，任何人都可以随手拍下一张漂亮的照片，并且大部分人都这样做了。蔚蓝色的天空，铅白色的教堂尖顶，几笔绚丽夺目的红色和金色相间的落叶点缀描绘……世界上没有多少地方能比这里更美。随意把相机对准任何方向，按下快门，手中的照片绝不会让你失望。色彩讨好般地取悦你，眼睛只是慵懒地享受着。

再过几个星期，11月到来，树叶凋零殆尽。等到下个季节开始的时候，眼睛必须时刻打起精神，不能吝惜自己的注意力，捕捉这黑与白的季节。11月的色彩转瞬即逝，不经意间就会逃过人们的注意。加拿大舞鹤草的深红色小浆果，云杉枝头金冠戴菊鸟闪闪发光的帽子，露出地面的花岗岩中粉色长石的斑点，11月的色彩需要眼睛辛勤劳动才能发现。

马尔科姆说，严肃的摄影师，能抵抗"颜色的甜言蜜语"。走在11月的树林里，就像拍摄一张黑白照片，眼睛必须编译自然之美。必须让黑色的硬松树皮成为五子雀的玫瑰色胸膛的相框，必须在冬日山毛榉的卷曲叶片中分辨出新鲜出炉的面包的颜色，这是眼睛的微妙化学反应。诗人玛克辛·库敏写道："山毛榉是整个冬天都营业的烘焙店。"这么一点点色彩，就让艺术具有了大师风范。但是今天，卖弄招摇的10月填满了我的窗口，试图吸引我的注意，奋力将全部的能量挤进我的每一寸视线中。一个月之内，这些喧嚣的、令人眼花缭乱的颜色就会全部消失。10月的色彩助长了大自然的信誉，而11月的色彩却称得上是一件艺术品。



如同11月的色彩，夜空中的色彩也一样精美绝伦。夜空是全年都存在的11月。夜晚是只用了黑与白两种颜料涂绘的画作。恒星在纯净氯化银的底片上闪烁单色的光芒。群星心有灵犀，褪去色彩。

是这样吗？用一个小小的技巧就能证明恒星不仅仅是底片上的白色光点。许多恒星的确是白色的，但还有红色、橙色、黄色和蓝色的恒

星。据说，有些还是绿色或紫色的。而恒星对急躁的眼睛只呈现出白色，是由于发生在我们双眼中的化学事故。

在我们眼睛的视网膜上有两种感光细胞：视杆细胞和视锥细胞。视锥细胞是颜色的感受器，但是对暗弱的光不敏感。视杆细胞对暗光有着更好的适应力，但它们无法区分颜色。当我们凝望星星的时候，是那些对暗弱光源敏感但色盲的视杆细胞在起着主要的作用，这就是为什么恒星用肉眼看起来大多是白色的。但当我们借助望远镜看向它们，或是花时间认真观测比较明亮的恒星时，它们就会如彩虹般呈现出不同的色彩。

恒星的颜色取决于其表面的温度。从这个角度说，恒星就和其他发出炽热光芒的物体一样。任何物体只要温度高到足以达到白炽状态，就可以发出暗红色的光芒。随着温度继续上升，在短波（蓝色）波段的辐射能量相对长波（红色）波段增加。物体越来越热，它的颜色就从红色，变成橙色、黄色、白色，直到蓝色。当然，恒星的颜色从来都不是纯粹的单色，而是所有波长的辐射的混合，我们双眼对其颜色的感知取决于在它的光谱的某一部分中成为主导的颜色。所以或许我应该说它的颜色从偏红，变成偏橙、偏黄、偏白，最终成为蓝白色。我们的太阳的表面温度大约为5800摄氏度，和所有达到这个温度的白炽物体一样，它会辐射出以黄色为主导的光。所有的孩子都会在画太阳的时候为它涂上黄色的脸庞。太阳的黄色色调在我们看来十分显眼，因为这颗恒星离我们很近，而且非常明亮，所以我们视网膜的视锥细胞可以开始工作，有效地“看见”颜色。但是，如果把太阳放到半人马座α星A，这位同样是黄色的、太阳的同胞兄弟的位置上，那么你只能在漆黑的夜空中看到它化作一个小小的白点。

细心的观测者可以区分出夜空中较明亮的恒星的颜色。我总是指着心宿二，称它为“红星”，或是把织女星叫作“蓝星”。这么说有一点夸大其词。心宿二的分类为红巨星，但用肉眼观测它可能只会呈现出暗淡的橙色。至于织女星，如果它看起来是蓝色的，那么真实的它就只是一颗白色的带点蓝光的星星。就连太阳，尽管孩子们都幻想它有着一张黄色的面庞，可实际上它的脸色要比想象中苍白得多。也许观察恒星真正颜色的最好办法是通过对比。猎户座就提供了生动的示例。参宿七，这颗位于巨人前脚的明星毫无疑问是蓝色的。在猎户举起的手臂上的参宿四是橙色的。通过在两颗星之间来回扫视对比，很容易就能看出它们之间的颜色差别。如果借助双筒望远镜或天文望远镜放大星光的强度，恒星的颜色则更容易被感知。我最喜欢的恒星色彩示例是位于天鹅座鸟喙位置的天鹅座β星。用一台小型设备就可以发现，天鹅座β星是一对双星，其中的一颗成员星呈现金色，而另一颗则是亮蓝色的。一旦你在望远镜中看到了它们真正的光彩，就不会再以为它们只是单调平凡的白色的了。

观测夜空的艺术，50%靠视力，50%靠想象力。没有什么能比群星的色彩更好地阐明这句话的真实意义。19世纪的观测者们似乎有着最佳

的观察恒星颜色的运气，这无疑是因为在他们的观测中包含的想象成分要比视觉成分更多。理查德·辛克利·艾伦有本书叫《恒星的名字：它们的传说及含义》，出版于20世纪末。书中形容天鹅座β星为“黄玉色与蓝宝石色”。同样在较大尺寸的望远镜中呈现出双星系统的心宿二，在书中被描绘为“炽红色与翠绿色”。艾伦把其他明亮的恒星描述为樱桃色、玫瑰色、葡萄色和丁香色。读着他的书，你会觉得自己身处他家的后花园，而不是在幽深的夜空下。艾伦对色彩的描述大部分是借用了英国著名天文观测家威廉·亨利·史密斯的语言。这位大师的眼睛能分辨十几种白色的灰度，包括珍珠白、透明白、乳白、银白，以及平凡朴素的纯白。

19世纪最精巧的恒星颜色系统，是俄裔德籍天文学家威廉·斯特鲁维的贡献。斯特鲁维用拉丁语标签为恒星分类，这种文字本身就带有异域情调的光环，让色彩听上去很像热带鸟类的拉丁语名字：醒目的白（egregie albae）、明亮的黄（albaesubflavae）、暗紫（purpureae）、大红（rubrae）、忍冬果蓝（caeruleae）、青霉绿（virides）。有时候，这些基本的描述似乎还不够精确，所以斯特鲁维发明了一组新的术语，比如用olivaceasubrubicunda表示粉红橄榄色。如果给我指出一颗olivaceasubrubicunda的恒星，我需要刺激一下我的想象力才能体会这种艺术。

靠相机和电子设备的武装，现代天文学家可以用客观的数字记录恒星的颜色。猎户座的参宿七的色指数是 - 0.04，它的光谱类型为B8，这些是完全专业的说法，但业余的观星者只需要一点点想象力就能看到参宿七是蓝色的，而参宿四是橘红色的。史密斯凭着自己的想象水平，甚至可能会看到“苍白玫瑰色”的毕宿五或是“灿烂金黄色”的大角星。艾伦的书中描述三星系统轩辕十四中的那对双星为“红白色和群青色”。没有相机能捕捉到这样的颜色。

※

观星活动，就像拍摄黑白照片，也要求屏蔽对色彩世界的感知。在午夜的天空中没有引人入胜的日落，夜晚的森林里也没有狂躁骚动的或红或金的落叶。业余摄影师叹着气绝望地移开望远镜，但经验老到的观测者会适时抓住暗示，发动想象力丰富自己的调色盘。威廉·亨利·史密斯的眼睛透过望远镜紧盯着恒星，他看见了“番红花色”“西洋李色”“条纹玛瑙红”和“钴蓝色”，这些都是想象力的色卡。史密斯对恒星颜色的描述，让我想起了艺术家瓦西里·康定斯基[25]在他13岁的时候买了第一盒管状颜料的事情。康定斯基告诉我们，用手指最轻柔的力量挤压颜料管，色彩就会像呼吸着的生命一样缓缓流出。有些颜色充满活力、喜气洋洋；有些颜色耽于沉思、如梦似幻；有些颜色自恋张狂；有些颜色撒泼耍赖；有些颜色让人感觉愉悦放松；有些颜色正在悲伤抽泣。康定斯基手中的一些颜色很顽固，另一些却柔软充满弹性。艺术家近乎魔法的关于油画颜料的色彩体验，唤醒了西洋李色和钴蓝色的恒星。

恒星的颜色不能被轻易看见，这可能是恰到好处的安排。正如约翰·

巴勒斯所说，如果世界永远以一种赤裸裸的宏伟姿态出现，也许会超出我们的承受能力。但无限的一半仍然是无限。一点点的无限，也是无限的——如果我们能抓住那一点点的话。这里有一条线索，那里有一条线索，巴勒斯说，线索和暗示组成了我们前进的道路。

只有在完全黑暗、完全晴朗的夜晚，才可以仅凭肉眼分辨出猎户座大星云，它看起来就像巨人奥利翁的佩剑上一团模糊的白色光斑。在一台中等尺寸的设备里，这个星云散发着恐怖怪异的绿光，眼睛可以看出它的某种形状——就像一只蜷曲的手臂，而它末端的手掌正在承受烧灼。这个星云进行过长时间曝光的照片显示出正在经历初生痛苦的恒星的复杂细节。它的襁褓是坍缩中的明亮气体形成的旋涡和物质激流；它的摇篮由光年测量，充满了创造的能量。猎户座大星云的颜色在不同照片上的体现也是各有特点的。在柯达400彩色胶片上，猎户座大星云呈现出梅子色和淡紫色、蔚蓝色和奶白色。在埃克塔克罗姆400号彩色反转片上，星云呈现杏黄色和红色，还点缀着深赭色和棕色。在柯达1000底片上，猎户座大星云是深浅不一的紫色，带有玫瑰色的绯红。但所有这些颜色都是只存在于胶片上的人工产物。它们都不是如果我们能接近它，站在它绝妙的光芒里所能亲眼见到的这片星云的真实样子。在我桌上有一张猎户座大星云的照片，用特殊的方法重建了人眼对色彩的敏感度。印刷出来的照片的色彩来自3.9米口径英澳望远镜的三次黑白曝光。每张底片都是感光剂和滤光片联合作用的结果。这些滤光片可以穿越整个视觉的光谱，做出统一响应，再用遮蔽技术来增强星云的结构细节。猎户座大星云至少比我们的太阳系大20000倍，包含了足够多的氢、氦和其他物质，足够形成10000颗像我们的太阳这样的恒星。星云的光芒大部分都来自绿色的双电离氧和深红色的电离氢的α辐射。最近才诞生的炽热的年轻恒星还嵌埋在星云当中，它们的能量激发出了这些气体的光辉。英澳望远镜拍摄的照片显示，这片具有羽毛状气态纤维结构的星云，看起来就像一只正在捕食的凶猛的大鸟。在大鸟扭结的爪子里，紧抓着十几颗光线灼灼的白色恒星。氧元素绿色的光在中等尺寸的望远镜里可以被捕捉到，它与传统柯达胶片上呈现出的红色和蓝色混合成棕色和黄色。在合成后的印刷品中还可以看到橄榄色和卡其色，以及燃烧的篝火般的红色和橙色。这里有令人不安的棕色和灰色，像灰尘和煤渣一样堆积在黑色的空间里。这里有运动和暴力。这个星云似乎充满了可怕的恶毒力量。这不算一张漂亮的图片，这张精心雕琢的照片不是色彩艳丽的10月里美丽的佛蒙特州小村庄药店门前的快照。它是利维坦的脸，将我们拖入深如海底世界的可怕虚空。它是上帝强健的巨手，把我们攥紧在它无限宽阔的拳中。它是力量，就隐藏在无色的黑夜中，就像海浪中的礁石撞破了航船，就像白鲸把所有寻找它的人拖入了黑色的深渊。

※

如果不重读梅尔维尔关于目睹大白鲸的章节，我们就无法结束关于色彩的甜言蜜语的沉思。以实玛利反复为我们指出白色代表的美好与真实。他进行了大量的铺陈列举：雪白色战马，代表恺撒王朝王室的颜

色，纯洁的新娘，以及主宰精神的神明的象征。可在见到白鲸的时候，这一切都让他觉得不值一提。他说，白鲸的白色比之前的一切都更让他惊骇。在和白色有关的精神联想中，总缺不了甜美、荣誉和崇高。但在白色中也潜伏着某些难以捉摸的思想，植根在灵魂的最深处。“这些东西比暗示了鲜血的红色更能让人的灵魂感到恐慌。”当它与可怕的事物相叠，以实玛利得出结论，白色让这种恐惧感无边蔓延。

如果人眼的视网膜上只有视杆细胞，且它们同视锥细胞一样对颜色具有敏感度，那么恒星看起来就会闪耀着十月金秋的红色和金色，猎户座大星云就会像猎人膝盖上盛开的赭色和绿色花朵。如果真是这样，我们也许永远不会在天空中寻找神性。那么也许我们的神学就会变得如快照般容易理解；哲学像药店印刷的相片一样浅显；玄学经过美化修饰，变得异常简单。但是夜空，就像亚哈船长的大白鲸一样，在苍白中遮掩自身的浩瀚。“细想一下神秘的宇宙，它虽产生了每一种色泽，产生了伟大的光学原理，可它本身却始终是白色的或者是无色的。如果它对物质起作用而缺乏媒质的话，就会用它自己的空白色泽来渲染一切物体，甚至包括郁金香和玫瑰花在内。把这一切都仔细地想了以后，那么，横在我们面前的这个瘫痪了似的宇宙就是一个麻风病人了。”（以实玛利语）盲目的我们紧盯着那张包裹我们鲜艳璀璨星球的巨大的、不朽的裹尸布。想要找到通往星系的边缘，通往时间的起点的方向的朝圣者，必须放弃白日的舒适色彩，必须在黑白交错的海面上将自己发射进无尽夜空，必须在那无垠的空间中找出群星闪烁着的西洋李色、番红花色、葡萄色和稻草色。这场追寻可能需要超越你我承受能力的勇气，而且有可能，我们会被其吸引，深陷其中，迷恋上这个过程，就像亚哈船长。我们会坠入星海，将追捕的绳索紧紧地绑在所追寻的猎物上。“白鲸就是这白色中最杰出的代表。”以实玛利说，“你们对这种激烈的猎捕可觉得惊讶吗？”

14　昴星团的追随者

谁能说出现在从东方升起的巨大红色恒星的名字？或是那只在去年夏天的夜晚恸哭哀鸣，如同棕色巨蛾一样拍打着翅膀从藏身之处离去的鸟儿的名字？如今，我们没有什么动力去学习事物的名称。我们所理解的唯名主义哲学只是随意专横地给事物贴上标签，名字只是被随意分配的无意义的x。笨拙的小x在教科书中蹒跚而行，承载着全部的知识负担。现在，小x就是东方这颗红色恒星的天体坐标（4h 34.8m R.A., +16。28' Dec）。现在，小x就是在夏夜呜咽的夜鹰在博物学上的名称。

梭罗告诉我们，他在学习事物的印第安语名字的时候，开始用新的角度看待它们。当他问缅因州的一位印第安向导那片平静的湖水为什么被称为“Sebamook”的时候，向导回答他：“就好像这里有个地方，那里有个地方。你把另一个地方的水接过来再把这里灌满，水就留在这里，这就叫‘Sebamook’。”梭罗编写了一本印第安语的名词词典，就像缅因州森林的地图一样能给人们提供指导。它就是自然的历史。这些印第安语的名字提醒着梭罗，智慧并不只在我们自己的河渠中流淌。

在我们的自然中没有其他任何一部分像夜空一样蕴含着如此多的信息。夜晚是人类文化历史的宝库。恒星的名字就像是家庭相册中的条目，展示了我们过去的经历和成就。一些恒星的名字是描述恒星特点的形容词，比如：天狼星Sirius，意思是“闪闪发光的”或者“灼热的”。大角星Arcturus的名字来源于它所在的天空中的位置，它离大熊座不太远，所以它的含义是“熊的卫士”。有些恒星的名字指的是它处于星座中的位置：参宿四Betelgeuse源于阿拉伯语，可能意味着猎户的“手”。大部分恒星的名字其实都来自阿拉伯语：天秤座α星氐宿一Zubenelgenubi和天秤座β星氐宿四Zubeneschamali的意思是蝎子（现在这一部分恒星属于天秤座了）“南边的爪子”和“北边的爪子”，这是所有阿拉伯语星座名称中最具异域风情代表性的例子。恒星的名字也经常见于希腊语和拉丁语，老人星Canopus源自希腊语，御夫座α星Capella则是拉丁语。人马座σ星Nunki来自苏美尔语。在西方的星图上，至少有一颗星的名字来自汉语，它是仙后座的Tsih。Nunki的来源可以追溯到史前文明，猎犬座α星常陈一Cor Caroli，它的含义是“查理之心”，据说来源于牛顿的同事爱德蒙·哈雷，以纪念他们的国王查理二世。海豚座的恒星瓠瓜一Sualocin和瓠瓜四Rotanev在皮亚齐于1814年出版《巴勒莫星表》的时候才首次得以在星图上出现，它们的名称来源于皮亚齐助手的名字尼古拉斯·维纳托（Nicolaus Venator）的反写，这种别出心裁的命名方式一度让语源学家们感到非常迷惑不解。

据说，亚当在天堂有给万物起名字的特权。我能想象得出来，他会

多么严肃地履行职责。他坐在知识树下想了又想，突然间灵光一现，雀跃而起，低声自言自语道："柳树。"他想到了"柳树"这个名字。从此，这棵树的名字成为柳树，也只能是柳树。他开始想到"像柳树一样婀娜多姿的夏娃"以及"垂柳"这样的语言，语言在亚当的舌尖迸出火花，火花从这棵树扩散到灌木丛，从灌木丛燃烧到飞鸟，从飞鸟传递到星空。很快，夜晚的一切都被语言的火焰点燃。天狼、卫士、查理之心——群星在我们的智慧中燃烧。

※

那只如同棕色巨蛾般的鸟从藏身处展翅飞出，在夏日的夜晚啼鸣出它自己的名字。它是一只三声夜鹰。此刻正在我的窗外升起的那颗红色恒星是金牛座的毕宿五。让我跟你说一说关于这颗星的故事吧。毕宿五是金牛座最明亮的恒星，因此它获得了金牛座α的命名。在亨利·德雷珀所著星表中它被编为20139号恒星，而在《史密森星表》中它是第94027号。我们可以在夜空中金牛座的脸部位置找到毕星团，毕宿五就居于其中。自古以来，毕宿五就被看作毕星团的统治者，如同蜂巢中的蜂后。但是毕宿五实际上并不属于星团本身——它到我们的距离只有星团中恒星距离的一半。毕宿五的距离已经可以通过三角测距法（所谓的三角视差法）直接测量。利用这种方法，测量者可以通过设置基线并测量角度，来取得星团移动的最远距离峰值。天文学家测量恒星距离的时候，一般都会利用地球围绕太阳运动的轨道的直径作为基线。但是即便有了如此长的基线，这种测量方法也只能对距离最近的一些恒星起作用。毕宿五只是勉强处于三角测距的有效范围内，它离我们68光年远。如果你决定开车前往毕宿五，遵守每小时最高90千米的限速，那么要耗费8亿年才能到达。

毕宿五的光谱类型是K5，这意味着它的表面温度将近4000摄氏度，尽管我们称它为红色恒星（印度人称它为"红鹿"），但实际上它在肉眼中呈现暗淡的橙色。毕宿五是一颗巨星（但不是参宿四或心宿二那样的超巨星），它已经接近自己生命的终点，已经足够膨胀，正在慢慢死去。濒死的恒星通常会有些轻微的变化，它的表面会缓慢地内外脉动，就像疲惫不堪的呼吸，也像由心而生的哀叹。千万年之前，毕宿五还只是一颗中等尺寸的黄色恒星，就和如今我们的太阳一样，或许它也曾恰到好处地照耀温暖了某个行星家族。毕宿五的行星，就算曾经真的存在，现在也早因这颗恒星让人难以想象的高温而被灼成灰烬了。

像其他恒星一样，毕宿五也会在天空不停地移动。只不过这种移动仅凭几个夜晚是不足以观测到的，甚至穷尽人的一生也无法察觉。事实上，它是人类最早发现的有位移轨迹的恒星之一。公元509年3月在雅典记录了一次月亮遮掩毕宿五的现象。那天夜里，月亮直接从地球和这颗恒星之间穿过，短暂阻挡了它的光芒。毕宿五作为一颗稀少的一等亮星，有着足够接近月球表面的运动轨迹，所以这样的现象时常发生。我自己也目睹过几次月掩毕宿五。其中一次，月牙的边缘接近毕宿五，那一瞬间，毕宿五在距离月牙半度的位置闪耀着，然后——咔！——突然

消失不见，就像魔术师手中的一枚硬币。牛顿的朋友哈雷意识到，月亮在公元509年的3月不可能遮挡住毕宿五，除非恒星在当时的位置比现在往北偏不到1度。所以他得出结论，这颗恒星一定在天球上改变了自身原本的位置。我们现在把这种恒星在夜空中缓慢滑动的现象称为恒星的自行。在我的星表上写着，毕宿五的自行速度是每年0.2角秒[26]。这就意味着自雅典人记录的那次月掩毕宿五的现象到现在的1500年里，毕宿五移动的距离相当于月亮直径的四分之一。除了这种朝着猎户座方向进行的缓慢横向滑动之外，毕宿五也正在远离我们，这种运动可以通过观测恒星星光的轻微伸长或红化以获得确认。在从雅典发生月掩毕宿五现象到现在的1500年里，这颗恒星与我们之间的距离已经增加了3万亿千米。所以如果以90千米的时速开车前往毕宿五，无论经过几个8亿年也不可能到达。

所以现在我已经对毕宿五标记了x，而这个x脱胎于那些我们自称已经了解的恒星的x。我们已经知道宇宙不是星光熠熠的女神的美丽胴体，或是但丁与比阿特丽斯攀登的多层山峰。它来自积累了足够多的x标记的正确的赤经和赤纬、视差、自行、径向速度、星等和光谱类型，我们发现了星系和类星体的宇宙，光年和无限的宇宙。灵活的小x、空船、变色龙，一直是我们获得知识的工具。

毕宿五是这颗恒星的名字，虽然天文学家在某些必要的场合会把它记录为HD 29139。毕宿五，Aldebaran，意为“追随者”，源自阿拉伯语Al-Dabaran。大多数阿拉伯语的星名都是早期希腊语名称的翻译，但Al-Dabaran这个单词早在人们与古典科学产生任何关联之前就已经在阿拉伯语中被使用了。早先的阿拉伯人用星星来区分季节，让它们为自己在目之所及皆相同的沙漠海域里领航。沙漠中的旅行者与亚历山大的天文学家和数学家一样，都熟知这些星星的名字。

毕宿五“跟随”昴星团，那是金牛座空旷地区暗弱恒星的绿洲。昴星团中的六七颗恒星以裸眼看上去并不非常明亮，但在天空中却是独一无二的。当昴星团出现在东方地平线上方时，可以确定，毕宿五将在一个小时后在同一个地方升起，它会追随着那个闪闪发光的星团穿过整个夜空。

这颗恒星还有一些其他的阿拉伯语名字，可以翻译为“胖骆驼”或“昴星团的司机”。毕宿五的古罗马名字，Palilicium，纪念了牧羊人的特殊神灵，畜牧女神帕勒斯。当牧羊人在夜间照看羊群的时候，他们心中知道这颗恒星正在冉冉升起。托勒密称为“火炬手”，而巴比伦人称它为I-ku-u，意思是“众星的领路者”。而对于大多数现代观察者来说，毕宿五再也无法成为其他的什么东西，它只不过是向猎户座猛冲而去的公牛那双凶戾的红色眼瞳。

追随者、司机、胖骆驼、红眼：这些名字像极光一样照亮天空，它们将众星包裹进智慧的毛毯。诗人里尔克说：“最显著的喜悦，只有在我们从内在改变它的时候才会向我们展现。”里尔克给恒星和星座赋予了自

己的名字和生命，将它们从内在改变了。“在那里，看，”他喊道，“骑士、教员，以及被他们称为‘水果花环’的星座。然后，再远一些，往北极方向看：摇篮、道路、燃烧的书、娃娃、窗口。”里尔克声称，“那些生气盎然的、充满生活经验的东西”正在消失，它们被“空洞又无关紧要的”虚假事物排挤。据推测，篡位者是小x，与它的兄弟们列队整齐，一同前进，不可抗拒地渗透到我们熟悉的事物中。

但在这件事上里尔克肯定是错的，因为x本身就是一种有效的改变事物的工具。科学很好地利用了x，就像一头负重的驮兽承载了一项伟大的事业。它带领我们穿过了贝都因人的寒冷沙漠之夜，超越了指向昴星团的肥胖的红色恒星，就像牧羊人在一个比他所能梦见的更宏伟壮丽的宇宙中照看着他的羊群。在科学中，小x是一种装置、一种工具，可以让我们用一系列数学的方式修补无限的宇宙。在这方面它极其有效，因为宇宙的运行方式看上去似乎真的遵循着一套不可思议又卓越非凡的数学方法。因为x的存在，我们生活在一片悬挂着一颗正在以自己的热核光芒膨胀和燃烧的红巨星的夜空下，而不是存在“胖骆驼”或“红鹿”的夜晚。智慧已经流入新的河渠。我会跟随这条河。我会改变那些红色的巨星。我会赋予它们生命。我会让那些巨大的红色恒星属于我自己。

这是一个连续的故事。亚历山大的托勒密称毕宿五为“火炬手”，而罗马人则将这颗明星作为对畜牧女神的纪念。古典科学在罗马沦陷后日渐衰落，天文学和科学在欧洲大面积地消失。但阿拉伯人保留了旧有的传统学识。他们将希腊天文学的遗产翻译成伊斯兰教所使用的语言，并用自己的语言给希腊天文学注入新的知识。欧洲现在留存下来的中世纪及文艺复兴时期的天文学文献，皆源自阿拉伯语。西班牙成为这一传播中最重要的中心，因为阿拉伯和基督教学者自公元711年伊斯兰教征服西班牙以来就大量移居此地，与当地生活进行融合。西班牙的基督徒将10世纪后期的阿拉伯语文本翻译过来，正是从这些文本中我们得知了金牛座中那颗红色恒星的名字，它被翻译成了某种类似拉丁语的语言。那时候，毕宿五在欧洲得以保留它原来的阿拉伯语名称“追随者”，直到1603年，约翰·拜耳在科学革命的精神指引下，系统地用希腊字母对恒星命名，而“追随者”最终成为金牛座α。安妮·坎农和爱德华·皮克林在1918年至1924年编制的《亨利·德雷珀星表》中将毕宿五编为HD 29139，而在1966年问世的《史密森星表》中这颗恒星的编号为SAO 94027。因此，智慧的溪流在这片名为文化的崎岖土地上扭动翻滚。现在，它已经找到了一个又一个河渠，总是向着远方真正的汪洋大海流淌而去。

只要我们关注恒星，将它们命名为“胖骆驼”“金牛座α”“HD 29139”——把它们转化为我们内心的形象，那么夜晚就永远不会空洞，不会让人们无动于衷。我以一种冗长枯燥的方式重复着恒星的名字：毕宿五、五车五、参宿七、参宿四、参宿五、半人马座α星、巴纳德星、沃尔夫359、勃兰德2147星（和潜在的还没有被命名的伴星）。是我们自己，命名它们，凝望它们，让这些恒星成为无形的实体，赋予它们超越视觉的意义。它们依赖着我们，这正如同里尔克所说，我们就是改变群星的人，“我们的整个存在，我们心怀的起伏不定的爱，都是为了能让

我们适应这项任务”。

15　夜晚的形状

禅教导我们，所有的事物，无论是有意识的还是无意识的，都在寻找自己的真实本性——佛性。佛祖生活在“无家可归的家”中，唤醒了真实的自我。禅宗有一段有名的公案，叫作《日面佛月面佛》，讲的是日面佛和月面佛同时修行成道，获得因果正身。然而日面佛获得了1800年的寿命，月面佛却只有一个晚上的金身。

我是一个谨慎的夜晚朝圣者，一个在星空下徘徊的流浪者。我对我在宇宙中的家的认识也是短暂且不甚完整的。即便我曾迈入了日面佛的家，但我能停留的时间依然非常短暂。我的追求，收到的回报，仅是微弱的光芒和干涩的啼鸣，是存在于这里或那里的一点点线索和暗示，是脊椎的兴奋。对于“微小的细节”，我会有自己的判断。那么，请给我展示一张月亮的脸，一张血红色的月亮的脸。

1503年5月，克里斯托弗·哥伦布驾驶着两艘来自巴拿马的船第四次试图航行前往新大陆。经过多次试验和冒险，他打算在返回西班牙之前停靠在加勒比海的伊斯帕尼奥拉岛对船只进行改装。暴风雨的打击使行程瘫痪，再加上蚊虫肆虐，这支小舰队被困在了牙买加北部海岸。哥伦布派出12名男子乘坐独木舟向位于东部300千米远的伊斯帕尼奥拉寻求救援，而后的几个月，他带着其余的人等待援兵。为了获得食物，西班牙人与当地印第安人交换了珠子和镜子。终于，当地人厌倦了小饰品，并拒绝为滞留的水手提供食物。哥伦布想到了一个解决问题的办法。他用他手中的一本小册子为自己解了围，这是一本记录了对1504年2月29日晚月食的预测的天文学家雷格蒙塔努斯编写的《星历表》。哥伦布召集了当地酋长一同参加会议，并宣称如果他们不继续供给食物，就会“激怒”月亮。并且，正如他所说，即使月亮升起，也将会是鲜血的颜色。1504年是个闰年，所以那一年的2月有29天。就在2月29日的夜晚，月亮在日落时升起并溜进了地球的阴影中。与其他阴影不同，地球的阴影是红色的。太阳光经过地球弯曲表面周围的大气折射，长波把月亮染成了血的颜色。正如哥伦布和印第安人所看到的那样，地球的红色阴影在满月的脸上穿过，月亮从金色的西班牙钱币多布隆变成了诡异的深红色圆盘。我曾多次观看月食，那场景给人产生的心理印象的确是鬼魅般怪异神秘的。如果我不知道夜晚的地球锥形阴影的原理，我也会觉得自己像牙买加的印第安人一样遭受了“惩罚”。

夜晚有它的形状，是一个锥形。

在雪莱的《解放了的普罗米修斯》一书中，地球说了这样一句话：“我在夜晚的金字塔下旋转，金字塔指向了天堂，那是梦想喜乐的地

方。”多年前，当我第一次阅读这句话的时候，我对自己辨别出了心底一直痴迷的东西而感到震惊。我研究过天文学和光学，我了解本影和半影以及物体在不同种类的光线下的投影方式。在我的天文学课程中，我曾经通过绘制三角形来计算太阳、地球和月球的相对尺寸和距离。我猜我一直都知道，地球的阴影是锥形的，是它将黑暗带入太阳照射的空间。但是在读到雪莱的词句之前，我从来没有体会到，夜晚其实是一个从地球延伸出去的高大而黑暗的金字塔。

黑夜就像巫师的帽子，被地球戴在头上。巫师的帽子又尖又长，帽尖遥遥指向太阳的相反方向。“帽檐”的直径为13000千米，紧贴在地球的眉毛上。“帽尖”延伸到离地球140万千米高的顶点。巫师帽子阴影的高度比底部宽100倍，它与地球之间的距离是月球到地球距离的3倍还要多。每当月亮恰好穿过那顶黑暗的帽子，我们就能看到一次月食。

当我看到月食的时候，我想起的是雪莱的文字，而不是天文学的文献。地球弯曲表面的金字塔形阴影笼过月球的整个脸部并描绘出锥形的夜晚。自我读过他的文字，我心中的夜晚就不一样了。现在的夜晚有了具体的形状。这是知道和看见之间的区别。有一个关于某个男人的佛教故事是这么说的：他年轻的时候看到的树木是树木，风是风，月亮是月亮。随着年龄的增长，他开始问自己，为什么树木会像人类一样长大，为什么风从地球的各个角落吹来，为什么月亮会有阴晴圆缺。他对自己的所见全都提出了问题，他将所有的时间都花在追求答案上。过了一段时间之后，树木再次成为树木，风再次成为风，月亮又成为月亮。在我读过雪莱的文字之后，又看到过一次月食。月亮滑入地球的红色阴影。过了一会儿，月亮的脸变化成佛祖那圆形的红润脸颊，在夜晚的金字塔中泰然自若，面目安宁。这一刻，它只是月亮。

地球在它锥形的夜晚之下旋转。地球围绕太阳运行，深红色的阴影帽子追随着它，帽尖始终指向无尽远方。在那黑暗的帽子下，獾在沟渠中徘徊，跟踪着在夜间爬行的蛞蝓和甲虫。蝙蝠拍打着空气，发出只有孩子才能听到的尖锐叫声。橡树林中的猫头鹰对着月亮啼叫。在那黑暗的帽子下，负鼠、狐狸、浣熊、萤火虫、修道院的灯笼，忽明忽暗。在那黑暗的帽子下，幽灵和妖精、梦魇和魅魔、男妖和女妖，甚至连撒旦都开始出没。天文学家摆好了他们的高脚椅，将他们的观星设备指向了长长的帽筒，跟随地球的影子一直上升到宇宙的“生态圈”中。一层一层，一步一步，一排一排，经过幸运群岛，穿过乐土天堂，越过洁净圣域，坠入无际大海。那里有恒星和星系在召唤，而类星体像圣埃尔莫的火焰一样让人惊恐万分。

夜晚是锥形的，因为地球是圆的，而且比太阳还小。希腊人可能是在月食期间观察月球上地球圆形曲线的阴影，才会惊讶地发现原来地球是一个球体。当然，首先他们必须能猜测到是地球的阴影导致了月食，而不是天空中的龙或恶毒的神灵把月亮吞噬了。希腊人非常理性。他们用欧几里得取代了巴尔和宙斯。他们在尘土上画出了圆圈和直线，并从那些结构中发现夜晚的形状是锥形，直尺和指南针是他们的望远镜。但

希腊人要想体会到地球是球形的，需要的不仅仅是数学。最终，想象力给予了他们关于地球形状的真相，洞察力的纯粹与专注给予了他们灵感，如同一条直线般直击事实的核心。我有一位朋友，迈克·霍恩，利用这种想象力教授天文学。我常常在星空下和一群学生坐在一起，看着他毫无顾忌又喋喋不休地向大家传达一种感受，描述着地球是个球体这个事实。他伸出长长的胳膊，指向亚洲天幕下地平线上冉冉升起的太阳。他挑起眉毛，踮起脚，聚精会神地注视着地球的曲线，寻找前一天晚上见过的那颗恒星。他抬起双臂，拢出圆形，仿佛想要拥抱地球。当我看着他的时候，发现自己也踮起了脚、挑起了眉毛，就像父母在喂孩子吃饭的时候自己也张开了嘴一样，我在心里也拥抱着这个巨大的、隆起的圆形地球。

所有的行星都戴着夜晚的帽子。恒星附近的每个物体都投射出金字塔形的阴影。如果一名宇航员脚朝向太阳在地球轨道上自由飘浮，那他黑色的巫师帽可以达到30米长。有一个奇妙的巧合，月亮的“帽子”几乎与月球到地球之间的平均距离一样长。如果月球靠近远地点（离地球最远的位置）并且正好从地球和太阳之间穿过，它的阴影顶点就会正好落到地球表面之下。在这种情况下，人们仍然可以看到太阳如一道灿烂的光环围绕着月球，这就是我们所俗称的“日环食”。如果月亮不在远地点，它的阴影就会到达地球表面，当月亮从地球和太阳之间穿过时，它的阴影顶点就会像外科医生的手术刀一样切入地球。那些幸运地生活在手术切口处的人将会亲身体验到大自然最壮观的天文景观之一，即日全食。观看日全食的人站在月夜的尽头，这一瞬间，白天向夜晚借来了黑暗，蝙蝠飞翔，猫头鹰鸣叫，獾从它们的洞穴里向外偷看。

有时，当月亮与地球的距离恰好时，它的阴影会像羽毛尖一样轻柔地刷过地球表面，而日食则处于日环食和日全食之间的临界状态。1984年5月30日的日食就是这样的。月球的阴影投到地球表面时，它与地球间的距离其实非常近，以至于人们几乎可以从地球上跳上它的顶点。黑色羽毛的尖端正好经过新奥尔良、亚特兰大、格林斯伯勒和弗吉尼亚州的彼得堡，然后沿着马里兰州的东岸移到海边。月球上最高的山峰直指太阳的边缘，遮挡住它。但阳光穿过月亮的山谷闪耀出光芒，就像项链上闪闪动人的钻石，就像从破碎的碗口边溢出的光线。在雪莱的诗中，这就是地球所说的全部台词：“我在黑夜的金字塔下转动，这金字塔怀着欢欣高耸入天空，在我醉迷的瞌睡中低吟胜利的欢歌，如同青年躺在美丽的阴影里，做着缱绻的好梦，轻声叹息；如同酒神，快活得发了疯。”月亮回应说：“就像在柔和甜蜜的月食中，当灵魂与灵魂在情人的嘴唇上相遇时。”1984年5月30日，月亮打断了太阳的光，吻得太温柔，甚至没有被感觉到。

※

恒星附近的每一个物体都会拢在一个夜晚的锥形中。而每颗恒星附近的那圈锥形阴影环，都像是指向虚空的荆棘王冠。太阳家族的夜晚是九颗行星、几十颗卫星和一小群小行星的阴影。太阳系空间中的每一粒

尘埃都会投射出自己微小的黑暗金字塔。阳光像一颗布满由阴影所凝成的刺的海胆，融进暗夜。地球的夜之圆锥是圣灵带给深层空间和深度时间的礼物。在星球被日光照射的一面，大气将阳光散射到一片朦胧的“蓝色毛毯”中，地球的“蓝色世俗外壳”，威廉·布莱克是这么称呼它的，“物质的硬敷层将我们与永恒分开”。但是，当我们随着自转的地球一同旋转，进入那夜晚的黑暗锥体时，我们终于得以一窥宇宙的面目。几年前，我读过一个科幻故事，关于一颗处于拥有四个太阳的恒星系统中的行星。在这个故事中，两千年来只出现过一次，四个太阳同时消失，天空一片黑暗的情形。当这个奇异的现象发生时，这个星球上的人们第一次看到了夜晚，被它的威严所震撼。

夜晚的金字塔是地球在蓝色盔甲中的狭窄缝隙。布莱克说：“如果我们将知觉之门洗涤至净，万物便会以其无限的原貌出现在我们眼前。人们若将自己封闭起来，便只能从洞穴的狭窄细缝中窥探事物。”[27]蓝色的空气把我们封闭起来。只有通过夜晚的裂缝，我们才能瞥见无限。只有通过夜晚的裂缝，我们才能找到守护我们的日面佛。透过地球的蓝色世俗外壳上的锥形缝隙，我们像皮拉摩斯追求西斯贝一样追寻着无限的奥秘。

16　仲冬夜之梦

今天早上我在黎明前一小时起了床。空气很凉爽，天空无比清澈。我穿过树林，来到那个能提供给我一个高远又清晰的视野的地方，让我的视线可以越过宽广的草地，望向东方的天空。我知道我会看到什么。因为据说今天上午会出现一个非常难得的时机，能在同一片天空下同时看到全部五颗裸眼可视的行星。

南边的高空，火星和土星被安置在心宿二和角宿一之间。火星模仿着心宿二的红润光芒，土星复制了角宿一的洁白光彩。在远处草地的树木之上，金星和木星相依相偎，它们是天空中最明亮的两颗星状体；能看到它们靠得如此相近，就足以让我心甘情愿地早早醒来，赶赴这个安宁之地。我的星历告诉我，海王星和天王星也正在这两颗明亮行星的附近，只有望远镜才能让它们现出真身，而我却没有携带任何观测设备。冥王星也来凑热闹了，可即便有望远镜，我也不大可能看到它。在火星和土星之间，或者说在金星和木星之间，是一弯新月。它缓缓滑动，在我的视线中，慢慢地接近太阳。现在我等待着，注视着那条托载着初升旭日的地平线附近的天空。天空已经变亮了，紫罗兰色、蓝色和粉红色的光线像洋葱皮一样从仍在隐藏着的太阳上一层层剥落。之后，我终于看到了它，那颗小小的水星，在这个全员齐聚的盛宴中只肯羞涩地展露出一丝微芒。它太不显眼了，像一粒细微的尘埃。五颗行星！它们像是黄道上被丝线穿起的玻璃珠。五颗行星、月亮还有两颗灿烂的恒星，沿着黄道带列队成排。

中世纪的天文学家认为，宇宙是一个与地球同心的水晶球体，就像俄罗斯套娃一样层层嵌套。今天早上我看到的场景，很容易让我想到那个闪闪发光的、浩瀚无边的巨大套娃，层层叠叠，从地球往外蔓去。就在我看着天空的时候，首先是月球，正在明显地向东转动。然后是水星，来回往复地调整着与太阳相符合的频率。而后，金星、太阳、火星和木星，按距离的远近排列，直上天穹，每个球体都和着自己独特的圣洁韵律一圈一圈地旋转着。最终，所有这些固定的恒星——心大星和角宿一、天津四、织女星以及牛郎星——闭合在了一起，就像孕育了世间造物的玻璃容器，像占卜师的水晶球。它看上去是一个整洁的宇宙，就像我们孩童时代玩耍的小玻璃球，其中灌入了矿物油和白色薄片。飞快地晃动它一下，玻璃球中的雪花就会落在宁静美丽的场景上：一个小小的伯利恒，孩子们在一座有着白色塔尖的教堂前堆着雪人。

※

今早天空中的月亮刚刚新生4天。“这个旧的月亮消逝得多么慢，她

耽延了我的希望。”雅典公爵忒修斯在《仲夏夜之梦》中说道。而后，戏剧开场了。“四个白昼很快地便将成为黑夜，四个黑夜很快地可以在梦中消度过去。”希波吕忒回应道。在莎士比亚的时代，宇宙仍然是一个由同心球体组成的蛋，根据物质的内在价值来分层：中心是笨重的土地，然后是水、空气和火；植物和动物的等级从最低等的地衣到人类依次上升；国民阶级也由农民、士绅、领主到国王逐步提高；从空灵物质的外壳、月亮、太阳再到行星；从天使合唱团、纯洁的灵魂，最后到达上帝的宝座。月球是充斥着改变——欲望、爱情、贪婪、腐败、多变、信任——的陆地世界与在那之上亘古不变的永恒世界的界限。看看月亮是如何阴晴圆缺，看看行星和恒星是如何坚守自己的道路倔强向前。明天、后天和大后天，月亮将会趋向消亡。它会滑过金星和木星身旁，将水星轻轻推到一边，只为了与太阳相见，然后它将在傍晚的天空中重新出现4天，“就像一把银弓，出现在天空”。今天上午行星排成一条线，这现象的壮观与优雅将消失无存。只剩下我们自己，月亮和我。因此我不会再早早起来，我会尽情享用我的晚餐，看着月亮在我身边渐渐变得圆满。

不久前，我读到了梭罗的一篇鲜为人知的关于月光的文章。一篇短小而充满诗意的作品，萦绕着昏暗薄暮与迷蒙烟雾。他的主题是：月光“与我们内在的光芒不相称”。如果整个世界是一座舞台，那么月光足够照亮我们在这个球体上演出的一幕幕喜剧。一夜又一夜，我们目睹着月亮的阴晴圆缺。我们能够在自己的思想里感觉到它的潮起潮落。在无眠的午夜时分，我们能感受到月亮轻柔的引力，从不受日光影响的深深的泥沼中汲取黑暗的思绪。日光的宏伟信心已经一去不复返了。月光下，我们是混乱的元素。世界也处于一片混沌。石头浮到空气中、火堆里、与大地重叠的水域中，空气爆炸成火焰。这个星球上生活着一群傻瓜。蜡烛匠假装自己成了国王。国王像猫一样咆哮。夜晚是一出月亮主持的剧中剧。离开我们的潜意识，《仲夏夜之梦》中的这些角色——木匠、工匠、编织者、修缮者、修补匠和裁缝就进入我们的脑海中，“没有受损，而是无序”。月光足以满足他们放纵狂欢。

※

1609年到1610年的冬天，也许就像伦敦环球剧场的演员在作者出席的情况下演出《仲夏夜之梦》一样，帕多瓦的伽利略将他的新望远镜转向了月球。他看到了（或者至少我们认为他看到了）墨黑的海水和闪耀的土地、海洋和大陆、晨光中膨胀的山峰，还有阴影中消失的山谷。他对月亮和地球的随意比较成为他后来在教会中所遇到的困境的根源。自古希腊时期以来，认为月亮与地球在本质上相同的想法一直是非常危险的，因为这对确定了人类的适当位置的宇宙等级制度而言是具有破坏性的。伽利略并没有因亵渎神明而畏缩。他说，地球“绝不能被排除在众星旋转的舞姿之外。我们将证明地球是一个比月球还要辉煌的、游离的个体，而不是充斥着无趣的垃圾的阴沟”。当伽利略放下他的望远镜时，宇宙的外壳被打破了，嵌套的水晶球碎裂了，宇宙被打开，延伸到无限

远的远方。月球不是水晶球，也不是月亮女神戴安娜。月亮是另一个地球。或许，以一种更好的说法，地球是另一个月亮。上面的世界和下面的世界没有区别。大地和天空都受到相同的自然法则的约束，这些法则包含了变的规律，也包含了不变的规律。在伽利略观测了月球之后的一个世纪内，上百名作家想象了人们在月球、其他行星或者另外的太阳系中的行星上居住的场景。地球剧不是由月亮主持的“演出”，而是一幕剧中剧。可能，还会是剧中剧的剧中剧。

不久前，我读到盖伊·奥特威尔关于通过望远镜观测到的新月升起的描述。奥特威尔视野中放大的地平线是14千米外陡峭的山峰。月亮在空中升起，就像一座“山脉中新出现的失去光泽的银色山峰”。从望远镜中看，遥远的地平线上的树木都被放大到月球大小。如果坐在其中一棵树的树枝上，奥特威尔会写下这样的句子（让他的想象力遵从他在望远镜中所看到的事物）：“你在月球表面的广阔沙漠上向下看时会感到眩晕……就像有人在圣彼得大教堂的穹顶上盯着它的地板……你可以将硬币砸到环形山的坑洞里。”

奥特威尔描述的幻象如此令人震撼，如此引人注目，使我决定自己也做一次同样的观测。等待月亮升起没有问题，但寻找合适的地平线就需要花费一些时间。我花了几个月的时间才找到一处天空晴朗的地方，地平线足够遥远。时间是午夜前一个小时，月亮升起时不能是下弦月。我将望远镜指向了月亮会出现的那段地平线，一串山丘穿过黑暗的海湾。当月亮终于现身时，它覆着阴影的一侧首先升起。大约在这一侧升到远处山脊的顶部上方的一分钟之后，我才意识到它的出现。突然之间，山脊黑线上闪烁起光芒，好像在远处的山顶上开始了某种人类活动，例如异教徒的篝火晚会或火把节。而后，稍微弯曲的明暗交界处进入了视野，月亮表面呈现出了其亮面与暗面的分界线。那条线在我的视野中轻轻下垂，用金色光芒填满了我仪器的目镜。这是舞台布景的高潮部分，是适用于歌剧的戏剧技术展示。从地面竖直向上放射出了一排光线——不，不是竖直向上，而是向南倾斜，上升着离南方越来越近。我立刻就看到了月亮的中央高地，即东西两“海”之间的山区。就是那里！……在明暗交界线的凹陷处，在宁静海的东边边缘上。凹陷的边缘是明亮的阳光照射在月球上的巴尔干山脉和高加索山脉的山峰。蒸汽海从地平线离开，壮观的亚平宁山脉进入了视野，它们陡峭的东部侧翼捕捉到了太阳的全部光线。接下来，是一条由环形山列成的线——柏拉图、阿基米德、托勒密、第谷——它们的表面贫瘠枯萎、布满尘灰，自承受创世的暴力以来一直保持着满是疮痍的面目。我的视野已经离开阴影了，转而投向阳光灿烂的东部平原。地形变得不那么清晰了。我认出了巨大的、有着突出的中央峰的哥白尼环形山和年轻的、能放射出射线的开普勒环形山。这是月亮“潮湿”的一面——冷海、澄海、云海、风暴洋、露水湾——其实它们根本不是真正的海洋或海湾，而是尘土飞扬的沙漠，其阴影的形状就像是月亮上长了一张人脸。当月亮的整个圆盘最终从地平线上跳脱出来时，我瞥见了格里马尔迪环形山，它就如同一块黑色的斑点。这个时候正是月球的正午，如果你此时站在这个环形山里，抬头就可以看到太阳高高地悬在你头上。等等，月球上有没有伽利

略环形山呢？我不记得了。

整个壮观的“表演”只持续了一分钟。月亮的升起似乎漫长而沉闷，但它在一分钟之内就结束了。望远镜以某种方式放缓了空间中运行的时间。月亮升起后，我把眼睛从望远镜移开，月亮突然缩成一个遥远的光点，时间加快。我想起了菲利普·锡德尼爵士的十四行诗中的一句话：“迈着多么悲伤的步伐，哦，月亮，你爬上天空！多么沉静、多么苍白的面容。”[28]十四行诗的意象与我刚刚所看到的情形并不相符。望远镜发明于锡德尼死后第25年，与他错过了四分之一个世纪。望远镜中的月亮没有悲伤的步伐或苍白的面庞。在我透过望远镜观察月亮升空的那个夜晚，她像神秘美丽的湖中女神从黑暗的水中展露容颜，像被施了魔法的泰坦尼亚从深沉的长眠中复苏而起。高贵、自信、金碧辉煌，让人着迷。

但其实月亮根本没有升起。事实上，月亮真实的空间运动与我所看到的正相反。是地球在运动。是我和地球一起越过地平线朝着月球的方向坠落而去，是我与山坡、望远镜以及远处的山丘一起朝着月球的方向翻滚，朝着早已让我见识过格里马尔迪环形山那温暖地面的新的一天翻滚。我的眼睛被欺骗了，月亮不会升起，而是地球在月球之下转动。不是太阳沿着黄道带旅行，而是地球在巨大的太阳轨道上旋转。宇宙并不像幼虫的水晶裹茧一样包裹着沉睡的地球，而是正如伽利略所猜测的那样，地球是一只长了翅膀的夜行生物。

※

千万年来，月球的碎片一直像雨滴一样往地球上掉落。月球上的每个环形山都是遭受了小行星撞击而飞溅到太空中的月亮陨石留下的痕迹，这些陨石中有一些还溅落到了地球上。事实证明，南极冰盖是一个对飞溅的月球物质非常有效的收集器。从天而降的石头（一些来自月球，一些来自其他地方）落到冰封的陆地的中央高原上，它们被冰雪淹没，最终也成为不断生长的冰盖的一部分。冰从中央高原向外流入海岸，嵌入冰中的大气物质也随之流动。有些地方，冰进入大海会分裂成冰山，大块的南极冰漂浮在温暖的海水中。随着冰山融化，它们随身携带的从天而降的岩石就都沉落到了海底。但在其他某些地方，流动的冰盖会抬高海岸山脉。在这些地区背后的干燥风中，表面的冰会蒸发，这样，大气物质就留在了冰川表面，因此从天空落到冰上的一半大陆岩石都集中在了同一个地方。数百万年的陨石被冰和风聚集在一起，供地质学家收集。在那里，在南极山脉的背风处，地质学家弯腰捡拾着与宇航员从月球上带回来的成分相同的石头，这些岩石在小行星撞击月球表面后飞溅出来，穿越了空旷无垠的宇宙空间，被投掷到40万千米外的人类的控制范围内。它们不是绿色的奶酪，不是水晶，只是普通的岩石。玄武岩，黑色的、有花纹的、斑驳的玄武岩。也许，它们来自梦之湖，像硬币一样落到了地球上。

※

所以伽利略是对的。没有水晶球可以阻碍从天而降的硬币。今天早上我在草地上，乘着一颗行星，绕着轨道与另外八颗行星一起围着一颗黄色的恒星转动。九颗行星在宇宙这块黑色冰面上滑行，其中一颗用手臂挽着月亮。梭罗说，月光的黄昏是心灵天然的栖息地。

“可爱的月亮，我多谢你的灿灿金光。

板着脸孔的夜啊！漆黑的夜啊！

我的灵魂升到天堂。

太阳，收敛起光芒，

月亮，逃离这穹苍。”

17　仁慈、温和的地球

多年前的一个秋天的夜晚，我用望远镜对着天空观测。那时，我惊讶地看到远处有鹅的轮廓从月亮明亮的面孔前划过。在鸟儿向南迁徙的路途中能够恰好目睹它们映在月亮上的身影，似乎是一个非同寻常的巧合。这是夜晚送给我的一份私人礼物。我后来了解到，有组织的业余鸟类学家在无线电跟踪和借助雷达进行观测的技术发明之前，就是通过“观月”活动来研究鸟类的夜间迁徙。看来，我的月球鹅礼物并不是那么特别。

望远镜可以“伸缩”距离。我看到的月光映衬下的鹅离我只有几千米远，是距月亮的十万分之一，但是我强烈地感觉到，我把鸟儿赶到了遥远的外太空，它们扇动着翅膀，穿越了地球与其卫星之间的茫茫星海。为何不呢！安托万·德·圣·埃克苏佩里的小王子就是借助一群野生鸟类的迁徙才能从他的小行星来到地球的。何况，他也不是唯一一个把鸟类作为交通工具的太空旅行者。古代波斯的君主卡维·乌桑将四只老鹰固定在他的宝座上，让他能飞得比天使更高，直到老鹰疲惫不堪，让他“撞”回到了地球上。强大的猎人宁录试图攀爬巴别塔以登上天堂，失败之后他又尝试乘驾一只鸟飞往那里，结果同样没能成功。17世纪，神话屈服于理性和自然科学，但至少，人们依然将鸟类与载人航空旅行的任务联系在一起。弗朗西斯·培根和约翰·威尔金斯等学者甚至还认真讨论过如何利用鸟类协助人类飞行。

弗朗西斯·戈德温[29]在1638年出版的小说《月中人》中，描述了飞禽带着人类飞到了天空的顶点的情节。在戈德温的书中，一位名叫多明戈·冈萨雷斯的西班牙人将自己与一群野天鹅或灰雁绑在一起，借此实现了一次往返于月球的旅行。戈德温非常精通开普勒和伽利略的新物理学，他用这种方式告诉读者，当太空旅程行进到一个与地球相对的特定位置时，地球的引力就不再起作用了，连接旅行者与天鹅的线就会变得松弛。从那一刻起，这些鸟就会像水中的鱼一样移动得毫不费力，不必承受任何来自旅行者的负担。我们可以将太空之中的勇敢的多明戈全身上下各种状态看作一个整体。在离开地球的第12天，飞禽将多明戈放在了一座高高的月球山上，在那里他才开始注意到这新世界中令人难以置信的景象和色彩。不用怀疑，从月亮山上看到的奇迹正是像月球上空悬浮着的装饰物一般的蓝白色地球。至少，多明戈证实了哥白尼的一个关于地球运动的大胆猜想，因为他亲眼看到地球就在他的身下转动。

※

从太空中拍摄到的地球的照片是20世纪最美丽、最诱人的人工作品

之一。一旦你看过这样的照片，就不可能认为地球不是一个球体，不是一个被黄色星球捕捉在轨道上的球体，不是一个被拴在巨大椭圆轨道上的、笼罩着斑驳云朵的球体。正如多明戈·冈萨雷斯所看到的那样，这些照片引发了人们对从月球上观望地球的想象。我也会把我自己带向那里，抱着这个目的观察地球。我的桌子上有一张月亮的地图，我在上面选择了一个有利的位置：就在位于宁静海和澄海之间的海峡，海拔3万米高的普林尼乌斯环形山的中央。这是一个舒适的、远离了危海和死湖附近的崎岖高地遮挡的地方。在黎明前最后的黑暗时刻，就让它成为普利纽斯环形山的夜晚吧。我感觉，月球上的日出来得很快。没有开场白，没有热烈的欢迎，没有泛红的黎明来宣示太阳的来临。太阳圆盘的边缘突然出现在地平线上，刀片般的光线割入阴影之中，山峰像灯塔一样燃烧。但对于习惯了地球日出的人来说，或许还有另一种感觉，人们会觉得月球上的日出很慢，慢得像数秒一样。月球自转的速度是地球的三十分之一。月球上的一天相当于地球上的一个月。地球上的日出只需要两分钟，而在月球上，从晨光熹微到整个太阳从某座环形山的边缘上探出身来，需要一个小时。

即使太阳升过头顶，从普林尼乌斯环形山上看到的天空也仍被地球主宰着，从月球看地球，是从地球上看月亮大小的四倍，也是从地球上看太阳大小的四倍。从月球上看，地球是静止的。它在月球天空中的固定位置是月球特殊轨道运动的必然结果。月球每个月自转一圈，而这正是它绕地球运行一周所需的时间。这不是巧合。地球和月球之间的潮汐力将月球拉入同步轨道，使其始终将同一面朝向地球。这种同步行为的另一体现则是地球在月球的天空中一动不动——月球上的观测者看不到地球的升起和降落。以我在普林尼乌斯环形山中央山峰上的所见而言，地球永远都位于月球的天顶附近。月球上的日出时分，地球只有稍微超过一半的部分能够被太阳照射。接受阳光沐浴的半球被涂上绚烂的色彩。我辨别出北极冰盖纯净冰雪的白色和亚洲大陆飞扬尘土的褐色。现在，白昼消逝，黑夜降临。南极洲被折叠在地球南部的曲线下方，澳大利亚隐藏在黑暗中。

太阳脱离环形山的边缘升至天空。它从地平线爬向天顶用了7天的时间。即使太阳高悬空中，天空也是黑色的。在没有空气的月亮上，太阳和星星即刻可见，它们一起爬到地球等待着的地方——它是正午的守护者。当太阳升起，地球会变成一个薄薄的新月形状，像一只疲倦的眼睛慢慢闭上，直到在它的黑夜里化成一个完整的黑眼圈。最后，太阳和地球在天顶附近并肩而立，就像展示在太空黑色衬布上的一枚闪亮的一角硬币和一块大大的英国便士。整个普林尼乌斯环形山都被照亮了。我的山峰如小岛般浮在一汪纯净的光线中。

阴影拉长了。太阳和星星离开地球，栖息在天空的顶点，慢慢滑向普林尼乌斯环形山西侧的边缘。现在，我毫不倦怠地等待着月亮上的日落。梦之湖与宁静海的海湾早已倚靠在黑暗中。位于危海和宁静海之间的高地上的梦沼也已没入夜晚。我的山峰北边和南边的宽广盆地中溢满了阴影。太阳触及环形山的边缘，缓缓下沉到它身后。地平线将太阳一

口吞下，世界立刻坠入暗夜之中。

地球上巨大的猫头鹰目不转睛地看守着月球上的夜晚，现在，它能发现这片阴影正在慢慢地扩大。我瞥见地球南方角落里南极冰盖将那新月喂得发胖，也窥见沉睡的大陆醒来，走入白昼之中。带有白云模糊指纹的蓝色太平洋，在阳光中将自己的大部分都转变成了亚洲棕色的土地。之后，澳大利亚、中国、印度、阿拉伯、非洲和欧洲，还有胖胖的蓝色S形的大西洋，它们手拉手排着队从黑暗中走出来。站在船头的南美洲载着北美洲也一起驶入白天。随着普林尼乌斯环形山度过了它的月夜，整个世界再次被日光唤醒。

地球从圆满变得亏缺。猫头鹰慢慢闭上了双眼。夜晚出现在这个星球的西边，我再次看到大陆从白昼滑落到黑暗中。当我们在月球上经历了29.5个地球日，太阳的圆盘会再次出现在环形山的东缘。新的一天开始了。地球，栖息在天空的顶端，像一只站在世界屋脊的猫头鹰，眨了一下眼。

※

有些高等动物在永夜中过着它们自己的生活。海参、鼠尾鳕、鱼和吞鳗栖息在深度超过1200米的海洋深渊，这远远超出了日光能够照射到的距离范围，因此这些生物只能以海水中每日每夜漂落下来的有机物质为食，这些食物来自一颗星的能量，像一场温柔的雨从黑暗中降下。昆虫、蜘蛛、小龙虾和蝾螈都是幽灵般的白色无眼生物，它们生活在幽深洞穴的绝对黑暗之中，所以它们的饮食就只能依靠偶尔经过的过客来获得——蝙蝠、鸟类和老鼠——它们往返于日光之中，留下粪便喂养这些动物。鼹鼠、蟋蟀、蚯蚓和蜈蚣在土壤的微小洞穴中觅食有机残渣。所有这些生物，虽然适应了黑暗，但也都是以能进行光合作用的植物为顶端的食物链的一部分。这条规则有一个例外。最近人们发现了在海底裂谷存在着热液喷口，那里居住着完全隔绝于阳光的动物群落。通过与地球熔化的上地幔接触而被加热的富含矿物质的水，从被拉开的地壳的裂缝中冒出来。从热水中沉淀出来的矿物质构成了宝石般的岩石的内部结构。在绝对的、纯粹的黑夜中，细菌、管虫、巨蛤还有白蟹生存于这些海面数千米之下烟雾弥漫的烟囱中，直接从地球的核心中汲取着能量，以此为食。避光生物是生命故事的倒退。它们是返祖生物，是辍学者，是仍然戴着看得见的过去的徽章的退化的进化者。鼹鼠在用来阻隔土壤的皮肤的不透明的皮瓣后面残留着退化的眼睛。在洞穴中居住的小龙虾已经失去了所有与眼睛有关的痕迹，但依然保留了眼柄。盲目蝾螈头部两侧的色素斑所在的位置正是它们的祖先曾拥有眼睛的位置。这都是逆进化而行的现象。但光明始终代表了未来。我头上的这双眼睛是进化中的增强器，是地球用于自我检验的装置。将我大脑的神经通路进行编码的，是一个悬浮在黑夜中的蓝白色球体的形象，它在自己圆锥形的阴影中旋转，像月亮一样阴晴圆缺。它是一团聚集在铁芯上的顽固尘埃，被海水浸湿，被雾化的挥发物覆盖，被光敏薄膜与发光的有机物质包裹。

从月球上看，地球黑暗的一侧被反射的月光微微照亮。但地球也因自身的暗淡光芒而闪耀：萤火虫，发冷光的毒蕈和闪光鱼，会发光的浮游生物和细菌，微光闪烁的植物和动物，它们辐射出冷调的生物光，结合了氧气的蛋白质产生的光线比任何一颗恒星的光都要精致明亮。远东的某种真菌由于自身的光芒过于闪亮而使人从很远的地方就可以看到它们。“巨口”鲨的嘴唇上排布着数百个微小的光点，像挂在露天市场中的灯泡一样跳动闪烁，从而诱惑浮游生物向它大张着的口中自投罗网。有一些海星一旦受到威胁，就会主动脱落一只发光的手臂以分散攻击者的注意力。东南亚的同步发光萤种群中的雄性萤火虫每天晚上都会聚集在特殊的树上，一起闪烁它们尾部的微弱光芒。一开始各自都非常随意，之后逐渐同步，直到最后整棵树因所有的昆虫步调一致而闪耀，成为雄性昆虫为吸引周围几千米范围内异性而设置的明亮信标。如果地球上所有的光线制造者，不论是微观的还是宏观的，海洋的还是陆地的，都可以像同步发光萤一样以同样的频率闪烁光芒，一起眨眼，那么谁能说，从月球上看地球不会像一股鬼火，一颗生物行星，一盏在夜晚燃烧的南瓜灯，要求被人看到。

※

“我认为，探究上帝的形象和形式，”罗马自然历史学家老普林尼[30]写道，“是人类软弱的标志。无论上帝是什么，无论他在哪里，他都代表着所有的感受、所有的视觉、所有的听觉、所有的生命、所有的思想，所有的这一切都存在于他的自身之中。”老普林尼在其文字中对上帝形象和形式的描述尽可能地小心翼翼，尽量不去限制人们的想象。存在的一切都是他研究的主题。这些感官中没有一种会被忽视。对这个世界的视觉、嗅觉、味觉、听觉和触觉是平等的，都是对地球神性的珍贵启示的一部分。老普林尼将这些神圣的琐事构建成了37卷自然历史文献。第一卷，序言，献给古罗马皇帝提图斯·维斯帕先；第二卷的内容关于世界、元素和天体的形象；第三卷、第四卷、第五卷和第六卷都是对地理现象及知识的记载；第七卷的主要内容在于人类的发明；其余的卷目内容涉猎哺乳动物、鱼类、鸟类、昆虫、植物、药物、矿物质和宝石等领域。在这之中没有被沙海覆盖的绿洲，没有畅游在遥远海域中的鱼，没有洞穴、山泉、鹅卵石或岩石，这些超出了老普林尼的兴趣范围。在老普林尼的《自然史》中，地球在我们面前转动，好像我们正从月亮上看到地球展露出白昼与黑夜、海洋和陆地、沙漠和苔原，大地、水、空气和火焰逐一排列在我们面前那座上升的楼梯上，向月球延伸，向燃着神圣火焰的普林尼乌斯环形山的中央峰顶延伸，这是对平静与安宁的祭献。

如果老普林尼站在以他的名字命名的月球山上，看到地球悬挂在天顶之上，像是一盏悬挂在万神殿黑暗穹顶的明灯——它将在整个月亮日一直悬挂在那里，在夜晚的圆锥形帽子中转动30次，神圣而雄伟——那美妙的景象只会向他证实世界的神性。老普林尼的地球之歌是他《自然史》一书中最美丽的段落之一。“她在我们出生时接受了我们，”他写道，“自我们降生起就滋养着我们，而后也支持着我们；最后，当我们被

大自然的其他部分拒绝时，她还能拥抱我们，并用一种特殊的温柔抚慰我们。”大地、水、空气和火，在夜晚发着光；上帝的眼睛盯着圣殿的顶点，警惕而安慰。老普林尼继续道：“倾盆大雨，凝结成冰雹，涌入河道，积淀成为洪流；空气汇集成云层，咆哮着卷动飓风；但还有地球，亲切、温和、包容，一如既往，照顾着凡人的需要。”

18　等待彗星

“向天使赞颂这个世界吧。”诗人赖内·马利亚·里尔克在《杜伊诺哀歌之九》中说，“而非那些不可言说的世界。对他说些重要的吧。”顺其自然吧。当我们希望能够肯定地谈论阿尔法（α）和奥米伽（Ω）的时候，时间已经流逝了。空间和时间的存在已经超出了我们的语言所能表达的范畴。星系从言语的悬崖上坠落。也许，正如里尔克所说，我们在这里只说：房子、桥梁、喷泉、门。这就够了。看，天使说，这是一栋房子。“房子。”我重复着，赞扬着。还有一座桥。“桥。”我说。还有一座喷泉。“喷泉。”和一扇门。“门。”

天使说：“这，是一颗彗星。”

※

1948年，哈雷彗星在它长长的椭圆形轨道上的某个黑色角落里转动，那里甚至远远地超出了海王星轨道的范围。天文学家无法对其进行观测，只能对这颗看不到的彗星进行理论计算与数据记录。从这些资料来看，它倾向于朝向太阳运动，诗人泰德·休斯在诗句中对其进行描述道：“就像在太空薄冰上的溜冰者。”1982年10月，一支由加州理工大学的天文学家组成的团队，使用了安装在帕洛马山上的200英寸（约5米）口径望远镜主焦点上的“广角行星相机电荷耦合器件”，捕捉到了哈雷彗星回归的身影。那时，哈雷彗星离地球16亿千米，正在朝太阳径直飞来。正如我写过的，这颗彗星以全速穿过土星的轨道，但对肉眼而言依然是不可见的，它像幽灵一样出没于小犬座和猎户座之间的黑暗空间中。等到1985年至1986年的冬天，它将在傍晚的天空中甩动它白色的尾巴，向太阳直冲而去，再拖着沉重的身体爬回太阳系边缘的昏暗阁楼。

哈雷彗星每76年回归一次。这次的亮度和上次一样，都略显暗淡。1910年它与地球擦肩而过，向地球人展示了它闪耀璀璨的头部和横扫天际的尾巴的完整轮廓。然而，到了1986年，地球将处于其轨道的错误一侧，让我们看不到彗星的侧面。因此，即便哈雷彗星如约出现，也并不能保证它会重复过去的壮观表演，甚至有可能它那时的明亮程度还比不过近年来观测到的其他彗星。但哈雷彗星的每一次探访都必定引起人们的兴趣。它是唯一一颗绕轨运行周期不足一个世纪的明亮彗星（例如，科胡特克彗星在8万年之内不会再次回归）。牛顿的朋友爱德蒙·哈雷爵士预测了哈雷彗星的再现。哈雷依靠牛顿的万有引力理论，猜测1682年出现过的明亮彗星将在1758年末再次现身。这位天文学家没能活着见证他的预测。在1758年圣诞节那天，当名为约翰·帕利奇的德国农民利用一

台小型望远镜重新发现这颗彗星时，牛顿的理论，以及哈雷的预测，都得到了关键性的证实。我们现在知道，哈雷彗星与1066年刺绣在著名的贝叶挂毯上的彗星是同一颗，象征着上帝对威廉征服英格兰的神谕。因此，在君士坦丁堡沦为土耳其人的领地之后不久，当这颗彗星于1456年出现时，欧洲人感到非常害怕。而在218年，它是在罗马皇帝马克里努斯死亡之前现身的“可怕的火焰之星”。如此，已经有学者尝试将哈雷彗星与公元前12世纪的“幽灵”彗星联系起来，更有甚者认为哈雷彗星就是耶稣降生时出现的伯利恒之星。

在牛顿的理论和哈雷的成功预测出现之前，彗星似乎总是在人们意料之外的时刻突然出现，这让它们成为预兆和奇迹的象征。今天，彗星的可精确预测性使它的出现变得更像是为了满足人们的好奇心。马克·吐温出生于1835年哈雷彗星到访的期间。他说他伴着彗星而来，也该伴着彗星离开。结果就在马克·吐温去世的1910年，如他所愿，哈雷彗星真的再次绕过太阳出现在我们的夜空之中。这是一个好故事，这是关于吐温的降生与死亡的故事。毕竟，彗星的降临是出生的好时机，也是死亡的好时机，而76年已经足以成就一段可敬的生命。我的父亲出生在马克·吐温去世那年，也正是哈雷彗星到访的期间。他无法将他的生命跨度与彗星的运行周期相匹配，但是我将在1986年代替他完成这项宿命。当哈雷彗星划破夜空，向太阳直冲而去时，彗星会如过山车一般在椭圆形的轨道上呼啸而过，只散落一片尖叫。

※

首先，我们有科胡特克彗星。1973年3月，在德国汉堡天文台工作的卢波什·科胡特克在相片底片上发现了两颗光芒微弱的彗星。其中一颗彗星处于非常接近太阳的轨道上。因此它似乎注定会非常明亮，也许会像金星那样明亮。这是第一次有潜在的发光彗星在到达近日点之前许久就被发现的事例。不出意外，科胡特克彗星受到社会各界的广泛关注。报纸大肆宣传它即将到来的消息。关于彗星的书籍出现在报刊亭里。唯恐天下不乱的怪人们在公共场所分发有关世界末日的传单。富兰克林铸币厂用纯银制造印有“一生一次”字样的纪念币。最漂亮的邮轮QE2出售“彗星巡航”活动的船票，其中额外包括科学家的演讲和望远镜的使用讲解。每个人似乎都想要采取行动来和这颗彗星沾上些什么关系。毕竟1973年是发生了水门事件和副总统斯皮罗·阿格纽贪污丑闻的一年，民族信心跌落到了最低点。我们会让科胡特克成为一颗美国彗星，而当它出现时将用闪耀的光芒盈满夜空，让人们感到好像走在圣诞节期间布满彩灯的街头一样。彗星光彩照人地到访，头部和尾部就像是留给美国的一个令人眼花缭乱的惊叹号。它可不是那些天文学家每年能发现半打的暗弱小彗星之一，它是能引爆天空烟火的洲际弹道导弹，是圣诞节期间在黄金时段播出的特别节目，是我们的最盛大的橄榄球赛事“超级碗”。

然而，令人费解的是，这颗彗星未能达到预期的亮度。它可能是第一次接近我们的太阳，这是它的处女航，亮度早已被太阳风刮散了。在12月中旬精致的深蓝色曙光中，科胡特克彗星与我们玩起了捉迷藏。我

用双筒望远镜追逐它，但也仅仅是瞥见了一眼而已。1月初，科胡特克彗星在太阳旁边安静地滑行，再次现身在傍晚淡粉色的天空中。用双筒望远镜来看，它只是一块模糊不清的光斑，外表酷似仙女星系的双胞胎。随着时间推移，它慢慢攀上西部地平线上那棵松树，在金星与木星交会的时刻缓缓越过这两颗相互依偎的美丽行星的身侧。它继续滑行着，直到这个月快结束的时候，它终于得以与细长的新月在夜空中相会。科胡特克彗星的到访也是一种暗示与象征。出版商和邮轮企业家都很失望。但科胡特克是一颗完美的彗星，如同所有完美的事物一样，它不会如我们所希望的那样，而是以它原本的模样来被我们感知。

※

“……当我说‘我语言的局限，就是我世界的局限’，你笑了。我们整晚都在交谈，用舌头、用指尖、用牙齿。”[31]这是罗伯特·哈斯的诗句。舌头、指尖和牙齿！这是彗星的语言，沉默的夜间低语，讲述着黎明和黄昏。这是以淡淡的光线作为语法的语言，它沿着椭圆轨道滑行，收集引力，在太阳风中飘散。这是爱人间的颔首，是差别细微的语言，延伸着我们的世界。

1976年3月并不像羊羔那样温驯地前来。相反，它如雄狮般狂怒，挟着雪、冰和冰雹席卷而来。而远在狮鬃般厚重云层之外的某个地方，威斯特彗星就存在于那里。这颗彗星是1975年年底由理查德·威斯特在智利制造的相片底板上发现的，当时这颗彗星仍然无法直接以肉眼观测到。从一开始就可以很明显地看出，威斯特彗星要比科胡特克彗星更明亮，甚至也许是20世纪最明亮的彗星之一。但媒体并没有对此进行宣传，社会各界也没有表现出过多的关注。在科胡特克彗星身上吃过亏的企业家们一朝被蛇咬，十年怕井绳。到了3月3日，这颗彗星应该已经越过了太阳，北半球的观察者应该仅凭裸眼就可以目睹它的真容。但是这个星期每天都是阴云密布，随着时间流逝，我们很可能会完全错过这颗彗星。在云层后面，威斯特彗星继续沿着它的抛物线行进，像瞪羚一样轻蔑地晃动它的尾巴，因为它知道它的速度会比狮子还快。

在3月5日的日光中，云层融化了，雪地在阳光下短暂地烧灼。我抬起头，知道威斯特彗星就在那里，它迷失在阳光下，微弱的光芒无法与我们这颗暴怒的恒星相匹敌。之后，再一次地，云加入进来。我等待着，一天、两天、三天，我终于等来一个晴朗的黎明。3月8日早上5点，我在后院架起双筒望远镜。东部只有几缕散乱的云。我扫视地平线，没有彗星。不情愿地，我确定威斯特彗星太过暗弱，甚至可能比科胡特克彗星更暗淡，以至于无法用双筒望远镜观测到。随后，当我即将放弃这次搜寻的时候，视线中一朵小小的云飘向南方。那就是威斯特彗星，它如同一颗一等星闪耀夜空，轻而易举地滑进了肉眼可见的范围中。看上去它确实就是一颗彗星，样子就和在教科书中的照片上呈现的一样。长长的尾巴自地平线起延伸3到4度。这颗彗星比我期盼之中还要明亮得多，它是一个异常美丽的天体。我就站在冰冷的庭院里看着它，直到黎明的粉蓝色辉光淹没了彗星的光芒。

“心灵尽头的棕榈，”华莱士·史蒂文斯的一首诗歌是这样开头的，“超越最后的思想，升起，在青铜色的布景中。”[32]威斯特彗星是心灵尽头的那棵棕榈，是智力不自觉转向的直觉。威斯特彗星，像是转瞬即逝的想法，也像溶解在梦境边缘的黑暗中的善变的想象，巧妙地逃避着，溜过清晨的天空。它是史蒂文斯诗中的黄金鸟，在空间边缘的棕榈枝头纵声歌唱，它的羽毛闪闪发光，火焰从上面垂落下来。

1976年3月12日的夜晚，天气晴朗而寒冷。我知道，在我上床睡觉之后，第二天将会以在黑如石板的地平线上降临的黎明为开端。我也知道这可能是我最后一次看到威斯特彗星的机会，现在，它正从太阳全速出发，追逐着自己长长的尾巴。然而，当闹表响起时，我只是把它关掉，再次进入梦乡。我会为自己的懒惰而后悔。后来我的学生告诉我，那天早晨的彗星比以往任何时候都更明亮，彗尾都更长，在绝佳的晴朗黎明中向着群星延伸，光芒四射，闪烁耀眼。



威斯特彗星的回归周期为15000年。它上一次回到这里时，我们的克鲁马努人祖先还蜷缩在洞穴中，躲避着冷峻的冰河时代的威胁。威斯特彗星的轨道到太阳的距离是冥王星的40倍。从它在远地点接近于静止的慵懒状态来看，太阳对它的影响似乎并不比任何其他恒星更加突出。彗星运转到了看不到太阳的遥远极点，只有星光为它照亮。

彗星被称为“肮脏的雪球”，这是一种对大量冷冻水、二氧化碳、氨、甲烷和尘埃的混合物的粗野比喻。组成彗星的物质与组成生命的物质相同。把一个彗星加热，在它附近打燃火花，它就会膨胀起来，表面像蚁冢一样出现许多细小的孔洞。它会用尽生命爬行，直到变得像一只烂瓜。彗星的组成物质和构成我们身体的成分一样，而彗星在地球上空那短暂、可预测的出现则是我们想象力运作的结果。我们将语言扭曲延伸，包围住它。

彗星起源于一个由挥发性物质构成的包围着太阳系的球体云团，即所谓的奥尔特云。在云团的外层有着数十亿颗彗星朝向太阳蓄势待发。一旦某颗彗星进入太阳系内部，开始周期性地沿绕日轨道运行，它最终必将被吹散、蒸发。彗星尾巴的出现意味着彗星的体积正在逐渐减小，因为彗尾是彗星逆着阳光的方向所释放的物质。每次展现出这样的身姿，哈雷彗星都会比之前更加枯萎。但是，还有另外数十亿颗彗星做好了准备，等待着未来的光明之旅。“有一种更高级的神秘感，”D.H.劳伦斯说，“它不会使心灵之花凋零。”[33]更高级的神秘感，还是一个较低级的谜团？语言、土壤、种子中的神秘感，还是甚至现在还在小犬座和猎户座之间的黑暗空间中无形移动的神秘面纱？很快它将经过昴星团。我们等待着哈雷彗星，等待着这个大家伙。它是房子，是桥梁，是喷泉，是门。向天使赞颂这个世界吧，对他说些重要的事吧。舌头、指尖和牙齿。

19　慢慢的黑暗

昨天深夜，我走到位于马萨诸塞州的家附近的奎塞特小溪的木板桥上。天空黑暗又清澈，在这种如此接近大城市的地方，我们几乎看不到比这更加黑暗清澈的夜晚。在桥下流淌着的黑色溪水中，我看到了一道闪烁的光线，它似乎来自溪流深处，就像吉卜赛人的水晶球中跳动的火花。有那么一刻，我在脑海中思考着光线可能的来源——一种能反射光的石英粒子，或许也可能是一种微小的发冷光的植物或动物。然后，突然间，我知道我所看到的是什么了。它是倒映在奎塞特溪水中的五车二，悬挂于当前天顶上的一颗非常明亮的恒星。所以，恒星也在水中流动着。溪流似乎有几光年深。桥下面是另一个宇宙，正在黑暗的水中流淌。在溪流中旋转的星系就像石蚕虫卵。恒星星云与蜻蜓若虫相互做伴。蚊子的幼虫靠吞食新星的尘埃为生。

如此明亮的夜晚！没有月亮，甚至没有行星争抢天空中最微弱的星光。仙女座的恒星仍然悬挂在西边高空。我在群星的模糊斑点中寻找仙女星系——它在《梅西耶星表》中的编号为M31，我只在条件最好的夜晚以肉眼见到过它。我很快就发现了它，就在仙后座恒星奎宿九的北边、王良四的南边。仙女星系，银河系的伴侣，飘浮在星空之外。我所看到的并不是真正的光源，它更像是滴落在玻璃窗上的雨滴。在我看来，今夜是用望远镜观测星系的绝佳机会，即使仅凭裸眼也可以轻而易举地看到伟大的仙女星系——M31。风车星系、三角座星系和位于双鱼座很暗很暗的旋涡星系M74也都在它的附近。大熊座和狮子座在东部升起，几个小时之内，它们就会因为地球的自转而移动到适合观测的位置。我走到学校，打开了天文台圆顶的天窗。

※

“小东西们，再靠近些！”这是西奥多·罗特克的一行诗句，我在这本书中已经不止一次引用过这首诗。在我看来，这句话对夜晚的探索者来说是再合适不过的祈祷语。夜晚所使用的语言，就像伯纳德在弗吉尼亚·伍尔芙的《海浪》中所渴望的那种语言一样，只寥寥几个音节就能表达丰富的含义：“这种语言，就像是情人之间使用的语言，破碎的词语，难以理解的词汇，如同人行道上拖曳的脚步声。”我经常向朋友和学生们展示仙女星系。他们有时会对在望远镜的目镜中看到的朦胧光团表现出失望的惊讶。或许他们对一个叫作“大星系”的物体抱有过多的期待，或者他们可能已经看到经过天文台长时间曝光处理的仙女星系的照片，所以才对“现实生活中”的星系不像10寸照片上显示的那样清晰而感到失望。用望远镜观测深邃的天空意味着聆听遥远的呐喊，那传入耳中的微弱声

音，那被数光年的距离压抑、打断，模糊不清的声音，梦中萦绕的声音，耳畔的低语，甜蜜得不知所云。“靠近点儿，你们这些小东西！”我将14英寸星特朗望远镜指向仙女座。

仙女星系是所有旋涡星系中距离我们最近、最明亮的星系，位于银河系之外200万光年的地方。昨晚，在望远镜中，一道达到了2度或3度的暗淡椭圆形光线围绕着明亮的核心划过天空。我很少看到比这个夜晚所展现出的更加壮观的仙女星系。想看到三角座M33螺旋星系就更加困难了。我选择了一个广角低功率的目镜来观测这个微小的星座，对着黑暗的夜空进行细微调整以求尽快找到能宣告这个星系现身的迹象。我花了相当长的时间才找到了我想要的东西，可一旦找到，它就能很容易地保留在我的视野里。三角座星系中可能存在着100亿个太阳，在黑夜中流动着，如同黑色溪水中映出的群星倒影。双鱼座的M74是另一个正面朝向我们的旋涡星系，天文台为它拍摄的照片显示出它的外表看起来就像是两条由明亮恒星组成的旋臂紧紧地环绕在一起。早先的经验告诉我，找到这个独一无二的观测对象将是当夜的一大挑战。我的望远镜从双鱼座主星右更二开始观测，然后将目镜侧向移动，滑进将右更二与白羊座的恒星娄宿一分隔开的黑暗深渊。我相信我看到了M74，它轻声低语，它如此透明，只有照片才能证明它真的存在。

现在我把天文台的圆顶转过来，面对正从东北方升起的北斗七星。一如既往，我轻而易举地找到了M81和M82这两个最显眼的星系。它们是一对发着白光的椭圆形，一个胖，一个瘦。如果想要看到悬于北斗七星的勺柄末端的风车星系M101则需要更多时间，它的光亮对黑暗的削弱几乎是不可察觉的。但是，那夜在猎犬座附近探寻到的涡状星系是我记忆中观测到的状态最好的一次。在望远镜中看起来它的边界清晰而明确，带着一条极细的螺旋状手臂，还有一朵清晰可辨的、挂在它尾巴上向下悬垂的伴星云。我昨晚还看到了其他星系，其他遥远而模糊的光斑，其他比想象中还要多的旋涡星系，其他超出了我的语言和认知的宇宙的暗示。所有的星系，除了离我们最近的那些，都在离我远去。它们在黑暗中奔跑，延伸着逐渐暗淡的光芒，将夜晚染得更黑，将宇宙拉扯得像太妃糖一样薄。宇宙正在扩张！位于猎犬座的涡状星系距离我们有3500万光年，而且还在以每秒550千米的速度远离银河系。今晚，这个星系比昨晚距离我们又远了5000万千米。这是星系规模的微小膨胀，是充满耐心、不可阻挡、最终却会精疲力竭的微小膨胀。

※

现在，天文学家普遍认为宇宙过去与未来的演变是由宇宙大爆炸最初的几个瞬间确定的。是的，莪默·伽亚谟在《鲁拜集》中写道：“云山沧海何年尽，都在鸿蒙纸上书。”[34]140亿年前，一场至关重要的大爆炸造就了今天存在的一切——空间、时间、物质、星系和恒星。从那一刻起，宇宙的命运就已经注定了。然而，天文学家并不确定未来的宇宙那未完成的命运是怎样的。有一种可能性，宇宙将永远地继续膨胀下去，无限地稀释物质和能量的密度，黑暗增加，最终仅剩的一点微弱的

光芒也会熄灭。还有另一种可能性，引力作用将减缓并最终阻止目前正在进行的膨胀，将宇宙拉回到一起，回到宇宙初期无限致密的创世火球状态，就像干燥的骨头。干燥的骨头在噪声和骚动中聚集在一起，每一块都与在它之上的新鲜血肉紧密相连。

原则上，应该很容易确定宇宙将终结于永恒的夜晚或是单调的正午，那个时候物质究竟会无限稀疏散布，还是会在宇宙大爆炸的闪光中重生。如果宇宙目前的平均密度大于每立方米空间3个质子，那么引力终将占领上风，宇宙将朝着它最初的样子开始倒退。可是，如果当前宇宙的平均密度小于这个临界值，那么这种膨胀将会永远持续下去。目前我们对宇宙平均密度的估算远低于临界密度。但是这些数值是基于对发光物质的计算结果，即对可见恒星的质量和可见星系中明亮星云的累积的计算。如果不发光物质占宇宙质量的主要部分，那么，平均密度的估计值可能会大得离谱。天文学家们已经开始怀疑宇宙质量的很大一部分实际上可能巧妙地将自己隐藏得严严实实，在和我们玩着捉迷藏的游戏，它们可能存在于黑洞、死星、亚恒星天体或者巨大的中微子中，或许还会隐藏在一些我们无法想象的暗物质中。这个问题尚未解决。死于烈焰或是葬身冰川？光芒炫目或是置身黑暗？震耳轰鸣或是耳畔呜咽？至少现在我们还可以做出选择。让我们首先考虑第二个选项。目前，通过宇宙中物质的扩散，似乎有两个选项更有可能造成宇宙的死亡。星系彼此疾速远离，牵引它们的引力可能太弱，不足以阻止它们慢慢滑入黑暗。涡状星系与银河系的距离将在200亿年后增加一倍。但是地球上的人们不会在星光璀璨的冬夜去寻找那些微弱的光芒。到那时，太阳将因能量耗尽而死去，它会因死亡的阵痛而急剧膨胀，直到成为一颗红巨星。烧焦的地球将被冻结在黑暗中，变成一块躺在围绕着已熄灭的恒星的轨道上的死气沉沉的岩石。在几十万亿年内，星系中的所有恒星都会因耗尽其能量资源而失去生命力。夜晚的灯光将不再闪耀。黑暗的恒星物质组成的星系将冰冷地、幽灵般地在黑暗中旋绕。这个过程将会经历数千万亿年，死亡星系中四处游逛的死星将会相遇，引力不再对它们有任何约束。偶尔，如果相遇的两颗恒星靠得足够接近，造成的碰撞会将其中一颗抛出它原本属于的星系，如此，这个星系将慢慢失去它的成员恒星。星系的蒸发！在一个星系中十之八九的质量都蒸发掉之后，重力将把剩下的所有物质都吸引到一个巨大的中央黑洞中。经过1亿亿年，旋涡星系的世界将被一群超大质量黑洞和无限空间中独立的非发光恒星所取代。再经过数十亿亿亿年，构成死亡恒星物质的质子将开始衰变，流浪的非发光恒星构成的宇宙将瓦解成一种充斥着电子和正电子的稀薄气体，恒星自发地拆解，分散自身的物质。最后，巨大的黑洞将成为星系中仅剩的残留，它们的物质也会通过量子蒸发慢慢流失。再经过1010个年头，宇宙将成为一种弥漫着电子、正电子、中微子和光子的极端扩散的气体，飘散得越来越远。创世的烛火熄灭，灯芯在指尖碾碎，烟尘被风吹散。

上述场景中，宇宙在寒冷和黑暗中迎来结局，其密度接近于零，物质如幽灵般缥缈无踪。但是，如果宇宙中存在足够多的隐藏物质，以至于能提供足够最终将宇宙中的物质重新拉回到一起的引力，那么又会怎

样呢？在接下去的1000亿年里，宇宙将继续扩张，但速度会越来越慢，直到最终由于速度的限制而达到平衡状态，就像一个球被抛向空中，然后瞬间停留在它的轨道顶端。当星系一起开始回落时，它们的内部成员将变成死星和超大质量黑洞。一开始，宇宙将缓慢收缩，但速度会逐渐加快。在宇宙最终收紧之前的140亿年，宇宙将回缩到一个能量密度与今天相同的状态。光的光子会从它们的回落中获得能量，宇宙会升温。在危机爆发之前的100万年，高能光子会将星际氢分解为质子和电子。在危机爆发前1年，恒星会分裂并爆炸。大约在同一时间，作为星系坍塌的核心的超大质量的黑洞将开始碰撞合并。它们会吞并散布在周围的弥散物质。多个黑洞最终将合并成一个与宇宙本身共同延伸的黑洞，一个朝着无限密度和无限微小的状态继续收缩的黑洞。整个宇宙收缩到一个针头的大小，收缩到一个大头针的针尖大小，收缩到一个原子的大小。宇宙的收缩没有限制，就像是把恒星和星系从排水管冲走，再把排水管本身也拉扯下去。

现在物理的方程式崩溃了，理论的水晶球暗淡了。也许这就是故事的结局。也许宇宙会从无限密集的状态反弹，开始另一次扩张，另一次大爆炸，伴随着新的恒星、新的星系与新的星夜的出现，重复创世的过程。或者，也许我们的宇宙只是众多宇宙泡泡中的一个，膨胀与爆裂，膨胀与坍塌，存在于无限个泡泡矩阵中的一个泡泡，从时空的组织结构中迸发出来，就好像伴随着嗞嗞声，香槟冲开软木塞，泡沫四处喷溅。

※

“我站在微火旁

细数缕缕火焰，我看着

光如何在墙上移动。我仍然保持沉默。

我在傍晚的空气中看到，

黑暗如何慢慢降临到我们身上。”

这同样是来自罗特克的诗句，辞藻跳动，正如缕缕火焰。星星倒映在溪水里，星系是望远镜目镜中模糊的光团污迹，阴影映上墙壁。一种轻声细语的语言，就像人行道上拖曳的脚步声，低声耳语。几周前，我在莫尔斯池塘附近的树林里散步。突然间，我被砰砰的声音包围，就好像捏爆米花糖发出的那种声响，就像从晴朗的天空降下冰雹打在树枝上。那是金缕梅，最引人注目的一种树。它的花期在11月，与季节不相符，小小的金色花朵像爆米花一样在灰色树枝上盛放，为阴沉的月份增添了香气和色彩。满地落叶的林地仿佛已经为这个季节画上了句点，但在这里，生命依然鲜活，还在欢快地嘎嘎作响。生命像恒星一样爆炸，黄色的花朵星系般盘旋，无法抑制地展现着蓬勃又旺盛的生命力。

我昨晚在仙女星系和大熊星座的黑暗空间中搜寻到的那些光斑，那些倒映在黑夜的池塘中的星河，并不是如同被遗弃的石头般，了无生气的、被遗忘了的星系。它们肯定会噼里啪啦地蹦蹦跳跳。物质燃烧着生命的火焰，无处不在。星星裹在绿色的光环中闪闪发光。行星喷发出孢子。星系大口呼吸。旋涡星系和风车星系像用来祈祷的转经筒般旋转不停。仙女星系是一艘载着成双成对的各种生物驶向美好夜晚的方舟。宇宙的命运就是生命的命运。

耶和华让以西结剃掉头发，把三分之一扔进火中燃烧，三分之一切割成小段，另外三分之一撒进空中随风飘散。但是他将一小部分的头发绑在了斗篷的下摆上，作为以色列的信念。就这样，三分之一的星系将被火烧掉，三分之一将被切成碎片，另外三分之一将随风飘散。宇宙将终结于烈焰或黑暗。恒星将像火山喷发后的雨水一样蒸腾消散。星系会崩塌扭曲成沉重的死结。而我们只是发丝，被缝在斗篷的下摆。

20　飞鸟与鱼

“羁鸟恋旧林，池鱼思故渊。”生活在4世纪的中国诗人陶渊明离开了城市，隐居于南边荒野中的茅草屋里，屋前桃李满园，屋后榆柳荫盖着房檐。夏天的夜晚，他也许会看到银河从东边的树篱上缓缓升起。树篱背后，在5000亿颗恒星的幽幽光线下，淡白的菊花正在盛放。

陶渊明生于晋朝一个颇有威望的家庭。他的曾祖父做过荆州刺史，被封为长沙郡公，父亲和祖父都是朝廷的官员。陶渊明自己的职业生涯也起步于行政部门的文职工作，但是他很快就厌倦了官僚机构的虚伪和圈套。他向上级汇报工作的时候拒绝系上象征官员身份的腰带，不愿意为了五斗米的俸禄向他人卑躬屈膝。33岁时，陶渊明的生活跌入谷底，他开始寻找心目中的“瓦尔登湖”。像梭罗一样，陶渊明在“人境”建造了自己的“草庐”，车马的喧嚣并没有对他造成困扰。“心远地自偏。”他写道。

陶渊明隐居在长江南岸的庐山，在这个纬度上，仲夏时节，东方的地平线上横陈着银河的银道面。地球向东自转，大地陷入黑夜，云团一般的银河从遥远天际线上渐渐升起。夏天的夜晚，陶渊明可以在他的树篱上看见银河系中心部分最充沛的璀璨星河，从北边的天鹅座，一直延伸到南边的天蝎座。或许，陶渊明的诗中描绘的场景其实来自天上的银河渡口和东方的苍龙星象，他笔下的菊花可能只能盛开在银河的灿烂星光里。

从庐山脚下到瓦尔登湖畔相距将近2万千米，但若利用天上银白色的星河拱桥，只一步就可跨越这段距离。在陶渊明身后1500年，梭罗在夏夜所看到的升起的银河，正如当年陶渊明见到的那样——同样模糊的恒星，同样的星座特征。中国南方荒村的诗人和美国康科德市的自然主义者，在他们共同拥有的银河系中毗邻而居：两颗遥远的心，同一片荒野。地球就是他们的隐居之所，周围环绕着群星的旷野。



“采菊东篱下，悠然见南山。山气日夕佳，飞鸟相与还。”陶渊明如此写道。今天晚上，就在黄昏时分，我看到两只夏天的大鸟——天鹅座和天鹰座——掠过东方的天空，飞了回来。这是我对夏夜星空了解最多的部分。银河中最明亮的那段溪流被一处暗礁分成两股，由北向南流淌着。在温暖的夏夜，我曾经用双筒望远镜和天文望远镜探索银河。我曾全神贯注地凝视天文台为这些在这条光之河中漂流的美丽超凡的天体拍摄的照片，我也曾亲自在夜空中搜寻到它们。夏夜的银河总是拥有精美

的礼物。这里有金色和蓝色的天鹅座β双星，在肉眼看来只是一颗单独的白点，但在小望远镜里，它们就会变成两颗尺寸惊人的太阳。它们中的一颗比我们的太阳亮760倍，另一颗亮120倍，分别呈现出蓝宝石和黄玉的颜色。两颗恒星之间的距离可以容纳55个太阳系一字排开。这是天鹅座61，我常在远离城市灯光的夜晚裸眼观测到它。它只是天鹅身体中数十亿颗恒星中毫不起眼的一颗，却也是最著名的那颗——它是贝塞尔在1838年用三角测距法直接测量出距离的第一颗恒星。天鹅座61距离我们11光年远，也就是105万亿千米，是从陶渊明的庐山到梭罗的瓦尔登湖之间的距离的100亿倍。在所有肉眼可见的恒星中，天鹅座61到地球的距离算是第四近，位列半人马座α星、天狼星以及波江座天苑四之后。这里还有面纱星云，纤维状的气体云形成问号的形状，就和萦绕庐山周围的云雾一样精致。有一次，我在爱尔兰一座山的背阴面用功能强大的双筒望远镜成功观测到面纱星云中最明亮的部分，那是一颗爆发后的恒星所吹出的包层。3万年以前，一颗距离我们1500光年的恒星就在这里爆发了。还有狐狸座的哑铃星云，在我8英寸（约20.3厘米）口径的望远镜中，我看到的它就只是一个简单的天体，是一团星尘，像苍穹中一抹用手指擦过的污痕。我还看到了两个精巧的星座，天箭座和海豚座。我认为它们比那些挤在天空另一端，把它们排挤在外的灿烂星座更惹人喜爱。天箭座和海豚座只是很微小的星座，它们所拥有的仅仅是四五颗五等星。它们在夜晚发出最微弱的光线，只有内行鉴赏家才了解它们的存在。今晚我用肉眼和双筒望远镜收集了夏夜的银河带来的礼物。这个区域里群星堆积如山，光芒黏稠淤积，星尘纷扬凌乱。我看到天河中跃动的大鱼拍打着数光年长的尾巴，繁星点缀的大鸟把羽毛藏在了翅膀下。我渴望看到旧林，我期盼天空中存在着故渊。我站在庭院里，整片旷野都是我一个人的。

※

陶渊明不是隐士，也不是修行者。他没穿苦行僧的刚毛衬衫，也没有为逃离这个世界而去南摩尔修行。他在寻找世界。他的乐趣在于自然、诗歌、书籍、美酒和家庭生活。他种植花卉，为东边树篱下盛开的菊花和盛夏时仍然潮湿鲜嫩的生菜而感到自豪。他在播种和耕作的间歇时而静坐阅读，时而弹奏琵琶。一阵温和的雨伴着“甜风”从东方飘来。陶渊明将目光落在水墨画上，欣赏着山峦、海洋、遥远的天际线，还有雾霭弥漫的森林。于是他写道：“欢来苦夕短，已复至天旭！”

今晚微风拂面，我站在门边，用双筒望远镜扫视人马座。我使劲地研究银河系的核心，如果天文学家们是对的，那么黑洞就隐藏在恒星群中。有一次，我在缅因州的一个黑暗的小海湾里游泳，每次我击打海水，都会激起数以百万计的浮游生物发出冷调光芒。甲藻，这种植物在受到刺激时会闪现出微弱的光亮，使得海洋看起来是在光的旋涡中闪烁，如同通过双筒望远镜观测到的人马座一样。我在纵观星座时，把目光锁定在了人马座γ星的北方。这是一个完美的夜晚，即使没有望远镜的辅助，人马座的星云也非常显眼。在我的仪器的视域中是一片大得荒

诞的白色星团。它不是花园树篱上的薄雾，它是一个没有尽头的星系世界。一个有着5000亿个拐角的、任由人身牛头怪物弥诺陶洛斯居住在中心的迷宫，人们面对它时只能手足无措。

难怪我们的祖先想象他们在夜空中看到了鸟类和鱼类、天鹅和海豚、老鹰和鲸鱼、小马、水瓶、竖琴，还有狼。人类宣布天上有88个被官方承认的星座——这88个星座正是我们所熟知的世界在夜晚的荒野中的投影。有些星座非常古老，当摩西在燃烧的灌木丛中听到声音时，它们就已经存在了。这88个星座中的48个早在托勒密所著的《天文学大成》中就已有记录。现存最古老的星图是由中国天文学家石申和甘德在公元前4世纪编制的。中国古人不是以现代天文学的眼光来研究星星的。根据小罗伯特·伯纳姆的说法，他们研究夜晚的自然秩序，然后以此为基础来达到稳固其社会秩序以及与个人生活相融合的目的。那么，我怎样才能让自己的生活与人马座星云相融合呢？这里是否存在尺度上的问题？我是否能按照微生物适应鲸鱼食道的方式适应银河系呢？我们曾一度相信银河是天地之间的桥梁，可现在我们不再这样理解它了！在银河系中，可能存在1000亿个地球以及一个荒诞的、无关紧要的天堂。

然而，我是银河的孩子。夜晚是我的母亲，星尘组成了我的身体，我身体里的每一个原子都经过恒星锻造。当宇宙大爆炸时，就已经有鸟儿渴望着栖息在枝头，有鱼儿渴望在池水里畅游。当第一个星系发光时，就已经有物质努力地向意识转化。人马座的星云是燃烧着的灌木丛。如果人马座发出声音，我怎能像傻瓜一样充耳不闻。如果上帝在夜晚的声音是微弱的哭泣，那我会竖起耳朵仔细聆听。只要夜晚的微光不至让我头昏眼花，那么我就会坐在黑暗的山坡上守望。听着，看着，等着。等待，永远等待，为了那“脊柱的兴奋”。



“孟夏草木长，绕屋树扶疏。众鸟欣有托，吾亦爱吾庐。”我把陶渊明的诗放在一边，倾听夜晚的声音。蟋蟀和猫头鹰、蝉和东风。我回想起春天里一个月光满溢的夜晚，我听到雄性丘鹬在起飞时热情地扇动三次翅膀，发出奇怪的共振颤动的声响，在飞行到最高处时发出清晰的钟声似的鸣叫。如果天球是个能打开的八音盒，那它的音乐一定就是这样的声音。我只是听到了丘鹬的声音，但没有看到它，至少没有在它在月光下飞行的时候看到它。我有时会羡慕某些夜行动物的夜视能力。狐狸眼睛的光敏性被视网膜后面的反射层增强，这层组织被称为照膜（照膜的反射，会使狐狸的眼睛在汽车大灯的照射下闪烁红光）。猫头鹰拥有巨大的像漏斗一样的眼睛，对夜晚微弱的光线就已经非常敏感，以至于它们需要第三层眼睑来产生一种半透明的遮挡效果以减弱白天炫目的光线对自己造成的影响。如果我拥有狐狸或猫头鹰的夜视能力，我也许就能看清丘鹬在月光下的飞行。但我有我的方法，能够让自己听到从看不到的地方发出的声响。即使是现在，我也能听到晚间蟋蟀和蝉的奏鸣，猫头鹰和风的夜曲，以及来自遥远群星的乐声。我曾经看到一只黄蜂将蝉那已麻痹的身体拖到树上。它试图飞得足够高，能让它将沉重的战利

品带回巢穴。有时候我觉得如果我能飞得足够高，就可以回到开始的地方，回到我的旧林，回到我的故渊，回到有绿叶繁茂的枝丫摇曳、繁星从东边树篱上如雾一般升起的田园。我甚至想回到创世之初的奇点，去看看鸟和鱼与星系如何一起被抛进那夜晚的旷野。

※

夏天的夜晚，天蝎座在东南天空中燃烧，位于它中心的是心宿二，这颗红色的恒星灼热得像狐狸的眼睛。威廉·亨利·史密斯称心宿二为“炽热的红色”。对我的眼睛来说它是橙色的。这颗星所在的类别被我们称为红巨星。红巨星是垂死的恒星，它臃肿、稀薄、膨胀。我们的太阳也会在耗尽其所有能量的那天膨胀成一颗红巨星。到那时，地球将被焚毁。桃和李子在枝头枯萎，柳树被烧焦，珍贵的菊花化为灰烬。太阳膨胀，我们的桃花源将被周围的荒野吞没。心宿二是颗超巨星。如果它处于太阳所在的位置，也就是在地球1亿5000万千米以外的地方，那么地球就会被这颗超巨星包裹在体内。

在中国古代，天蝎座附近的区域被称为青龙或东方之龙。伯纳姆谈到中国龙时说：“它不是中世纪基督教神话中吞噬少女的可怕怪兽，它是令人敬畏的力量与大自然的智慧和庄严的化身。”青龙玉器是中国墓葬文化中常见的艺术品，通常以蜿蜒的杆状，或权杖的形式呈现。这种玉器被称为如意，字面意思是“心想事成”。天蝎座弯曲的尾巴钩住银河。中国人幻想青龙现身于天河之上，降落凡间，赐福于那些对它虔诚敬奉的凡人。今晚，在陶渊明仰望青龙的1600年之后，我目睹了天蝎座的升起。巨大的、拥有红色心脏的天蝎座。它就是如意，是东方之龙，代表着“心想事成”。心想事成？这就是对我的祈祷的回答吗？恒星如此巨大，离我们那样遥远，仿佛对人类无关紧要。它们一直坚定地保持着沉默。它们离得太远，无法听到、更无法回应我的祈求。这是一片冷漠的荒野，肆意地吞噬着周围的一切。

我们有一种逃离荒野的寂静与黑暗的倾向。我们把神塑成偶像，挪进城里去，只有在某些庄严肃穆的时刻才接近他们。可当我们置身教堂和寺院时，谁又会听到荒原里的呼声？谁又会听到风吹动芦苇的响声？谁又会看到银河，这条无限深邃而清澈的河流，这条从春天流入海洋、从创世流入时间的河流，从东边树篱的上方升起？我们是“天蝎”尾巴上拂下的星尘。丘鹬在盘旋升空时鸣叫，野鹅用沉重的翅膀拍打空气。夜晚是旧林，夜晚是故渊。心宿二是一盏灯，燃烧着、闪耀着，在光亮中欢欣跃动。

“狗吠深巷中，鸡鸣桑树颠……久在樊笼里，复得返自然。”我读着陶渊明的诗句，想起了罗特克的祷告：“你这小东西，再靠近些！让我，哦，主啊，最后，做一件简单的事。”今晚的星星近得似乎触手可及。夏天的夜晚，银河与庭院相连，好似一排枝繁叶茂的树篱。星云绽放，如娇艳花朵。织女星、大角星和心宿二灯笼般悬于枝头。这就是我所拥抱的夜晚。亲爱的夜晚。

致谢

特别感谢罗伯特·古力特（Robert Goulet）和安妮·卡里格（Anne Carrigg）对本书做出的重要贡献，特别感谢迈克尔·麦柯迪（Michael McCurdy）用精彩的插画为本书增色。普伦蒂斯霍尔出版社（Prentice Hall）的编辑玛丽·凯南（Mary Kennan）是这本书的温柔守护者。同在普伦蒂斯霍尔出版社的埃里克·纽曼（Eric Newman）用他的专业知识和文字技巧为本书润色了文本。爱丽丝·莫罗（Alice Mauro）和哈尔·西格尔（Hal Siegel）将本书组织成精美优雅的形式。最后要特别感谢弗兰克·瑞安（Frank Ryan）和麦克·霍恩（Mike Horne），是他们在这次朝圣之旅即将启程的时候就已经陪伴在侧。

译后记

作为天文学家和科普工作者，很长时间以来，我都有一个想要解决的问题：究竟用什么样的方式写作才能把看似枯燥艰涩的天文学内容写得扣人心弦，又不失科学性？两年前我开始接触非虚构写作与创意写作，希望能借此学习相关知识并提升自己的科学写作水平。

可是，我大量阅读，不断寻找，都没能得到我想要的答案。我读了大量关于非洲某个地区所传播的严重疾病的事例——这本身就事关人的生死，具有天然的话题感；也读到某种海洋生物集体搁浅的报道——我们对生命的同情总是来得猛烈；当然，也读了一些著名成功人士的生活细节——我们需要八卦，这是生活中重要的调味品……

我从来没看到过有人专门讨论如何把银河系与平行宇宙的事情描述得特别优美，直到我读到罗伯特·鲁特（Robert Root）所著的《非虚构作家指南：关于创意非虚构的阅读和写作》一书，书中多次提到天文学家切特·雷莫（Chet Raymo）的作品THE SOUL OF THE NIGHT: An Astronomical Pilgrimage（本书的英文原版）。我十分吃惊，一部专业作家教授写作知识的教科书，竟然大量引用了天文学家的科普小册子作为教学案例，这本小册子到底有什么特别呢？

由此，我对切特·雷莫的著作以及他本人产生了浓厚的兴趣。当时国内还没有引进这本小册子，了解的人也不多，我只好委托在美国读书的朋友帮我带英文版回国。只粗略翻阅，我就再也放不下了。

全书开篇，作者绘声绘色地描述了波士顿大街上的滑板少年撞倒了一个小女孩的事情。有魔力般的语言，将这个原本仅持续了2秒钟的过程延伸到了十几分钟。在滑板撞倒孩子的一瞬间，仿佛一切注意力都被攫取，所有声音都凝固冻结。千钧一发之际，作者却转而开始讲述宇宙中的寂静时空和超新星爆发的遗迹。宇宙运转，被撞飞的孩子正好落地，波士顿大街又重新喧闹起来。

天哪！我从来没有读过以这样的语言写就的天文学内容，我从来没有想过在宇宙真空中声音无法传播的道理还可以这样讲述。

这根本就不是文字，而是活生生的电影，是蒙太奇！每每读到，立刻就可以在我眼前显现出动态的画面。翻译这本书是一种享受，是我当时最大的乐趣。

所以，我积极地推动这本书的引进工作，希望在以最快的速度完成

翻译的同时找到愿意将其引进国内的出版者。感谢“未读”的边建强老师慧眼识珠，以迅雷不及掩耳之势，凭借无可争议的竞争力拿下了本书的中译本版权。感谢宁书玉编辑，在本书的润色、校对甚至改译过程中倾尽了心血。

如果说，从无意中遇到这本书，被它震撼，再到翻译它的整个过程，我都是一个人享受着发现好书的乐趣，陶醉在书中的精彩段落，满足于个人的一点点小愿望的话，那么在它即将付梓之时，我必须借这个机会，把我的感受传递给你，希望它也能打动你，打动更多读者。

这本书真正打动我的地方，概括起来说有两点。

第一，作者的语言太过美好。如果不是读到这本书，我可能一直都会觉得关于天文学的科普知识与诗意优美的语言之间毫无联系。我甚至怀疑，如此高层次的文字驾驭能力对于科学表达来说是多此一举的奢侈品。现在，雷莫教授用这本书为我们提供了一个范例，打开了天文学科普的一扇窗。他告诉我们，在阅读——甚至写作与恒星有关的文字时，可以考虑这件事在人类历史上产生的文化符号，也可以借助此时此刻身边的一草一木共同营造出电影场景般的浪漫感；可以让家人在科普作品里登场，也可以在令人目眩的科学知识间大谈诗歌和美术。

第二，作者的学识太过渊博。不，学识可能只是一个不那么重要的角度，更严谨的说法是——作者的文化素养极高。翻译这本书最艰难的部分是处理作者信手拈来的大量现代诗歌，还要将作者随口提及的动植物种类一一核对确认。我从来没有读过其他任何能够涉猎如此宽广的文化领域的天文学科普作品。

通过以上两点，我得到了启发：天文学科普，甚至全部科学门类的科普，其本质绝不仅仅是把一门专业课通俗化这么简单。科普的本质，是文化素养的感染。说得再深一层，科普的本质是人类文化符号的贯穿。这是什么意思呢？

人类文化，本质上就是一个符号系统演化的过程。无论是名人堂还是科技史，留在历史上的只是一个符号，还有关于这个符号的一系列认知。在读者对银河系产生兴趣并逐步理解它之前，读者的心中就已经存在留存于整个人类社会的关于银河系的文化符号与朴素认知。科普的出发点，是对这些文化符号的梳理与唤醒。

这个启发适用于写作，同样也适用于阅读。

高爽

2019年6月18日 北京

[1] 约翰·巴勒斯（John Burroughs，1837—1921），美国博物学家、散文家，美国环保运动中的重要人物。巴勒斯不只是一位科学博物学者，更是一位有责任心记录自己对大自然独特视角的人文博物学者。国会图书馆“美国记忆”项目中的传记作家将约翰·巴勒斯视作继梭罗之后，美国文学的自然散文领域中最重要的实践者。其代表作《醒来的森林》被誉为自然文学中的经典之作。（本书注释均为编者注）

[2] 杰拉尔德·曼利·霍普金斯（Gerard Manley Hopkins，1844—1889），是一名英国诗人、罗马天主教徒及耶稣会神父，其故后在20世纪的声誉，使他成为最负盛名的维多利亚诗人。

[3] 节选自多丽丝·莱辛（Doris Lessing，1919—2013）的科幻小说《希卡斯塔》（*Shikasta*）。

[4] 节选自华莱士·史蒂文斯（Wallace Stevens，1879—1955）的诗作《不是关于事物的理念而是事物本身》（*Not Ideas about the Thing but the Thing Itself*）。

[5] 节选自里尔克的诗作《杜伊诺哀歌》。赖内·马利亚·里尔克（Rainer Maria Rilke，1875—1926），奥地利诗人，与叶芝、艾略特一同被誉为欧洲现代最伟大的三位诗人。代表作有《生活与诗歌》《祈祷书》等。

[6] 西奥多·罗特克（Theodore Roethke，1908—1963），美国著名诗人，曾就读于密歇根大学和哈佛大学，毕业后担任过英语教职。他的诗歌优美抒情，具有浓郁的生活气息和深刻的哲理，对植物和花卉的挚爱反映在他的诗歌创作之中。1954年，他的诗集《苏醒》获普利策诗歌奖。

[7] 节选自罗特克的诗歌《在黑暗的时光里》（*In a Dark Time*）。

[8] 莪默·伽亚谟（Omar Khayyam，1048—1131），波斯诗人、数学家、天文学家、医学家和哲学家，代表作《鲁拜集》。《鲁拜集》内容多感慨人生如寄、盛衰无常，以绝美的纯诗将人生淡淡的悲哀表达得淋漓尽致。诗作融科学家的观点与诗人的灵感于一体，成为文学艺术上的辉煌杰作。

[9] 节选自西尔维娅·普拉斯（Sylvia Plath，1932—1963）的诗歌《月与紫杉》（*The Moon and the Yew Tree*）。西尔维娅·普拉斯是继艾米莉·狄金森和伊丽莎白·毕肖普之后最重要的美国女诗人。其诗集《普拉斯诗全集》获1982年普利策奖。

[10] 海因里希·奥伯斯（Heinrich Olbers，1758—1840），德国天文学家、医生及物理学家。

[11] 节选自杰拉尔德·曼利·霍普金斯的诗歌《星夜》（*The Starlight Night*）。

[12] 由于宇宙膨胀，恒星的距离可以比140亿光年更远，但依然有限。

[13] 节选自西尔维娅·普拉斯的诗歌《我是垂直的》（*I Am Vertical*）。

[14] 典故出自莎士比亚的经典戏剧《暴风雨》（*The Tempest*）。

[15] 源自中世纪宗教著作《天阶序论》。

[16] 出于费用攀升、缺乏共识等原因，1993年10月美国众议院投票终止了这一项目。

[17] 节选自莎士比亚的戏剧《特洛伊罗斯与克瑞西达》（*Troilus and Cressida*）。

[18] 拉尔夫·沃尔多·爱默生（Ralph Waldo Emerson，1803—1882），美国思想家、文学家、诗人。确立美国文化精神的代表人物。代表作《论文集》。爱默生与梭罗是友人关系。

[19] 节选自罗特克的诗歌《在夜晚的空气中》（*In Evening Air*）。

[20] 小罗伯特·伯纳姆（Robert Burnham Junior，1931—1993），美国天文学家，著有《伯纳姆天体手册》。

[21] 人物出自《圣经·旧约·约伯记》。

[22] 哈罗·沙普利（Harlow Shapley，1885—1972），美国天文学家。曾提出银河系的中心不是太阳系，太阳系其实处在银河系的边缘。

[23] 弗隆，英国长度单位，1弗隆等于1/8英里或201.168米。

[24] 节选自约翰·多恩（John Donne，1572—1631）的诗歌《三重傻瓜》（*The Triple Fool*），引自《英国玄学诗鼻祖约翰·多恩诗集》，傅浩译。

[25] 瓦西里·康定斯基（Wassily Kandinsky，1866—1944），画家和美术理论家。是现代艺术的伟大人物之一，同时也是现代抽象艺术在理论和实践上的奠基人。

[26] 角秒，又称弧秒，是量度角度的单位。

[27] 节选自威廉·布莱克（William Blake，1757—1827）的诗歌《天堂与地狱的婚姻》（*The Marriage of Heaven and Hell*）。

[28] 节选自菲利普·锡德尼（ Philip Sidney，1554—1586）的诗歌《月

啊，迈着多么悲伤的步伐》（*With How Sad Steps,O Moon*）。

[29] 弗朗西斯·戈德温（Francis Godwin，1562—1633），英国主教、历史学家。他创作了英语文学史上第一个太空遨游故事《月中人》（Man in the Moon）。这本书毫无科学性可言，但它激起了那个时代的许多人对太空飞行的兴趣，并且在早期的同类作品中最有影响力。

[30] 盖乌斯·普林尼·塞孔都斯（Gaius Plinius Secundus，公元23或24—79），古罗马百科全书式的作家、博物学者，以《自然史》一书留名后世。其外甥为小普林尼。

[31] 节选自罗伯特·哈斯（Robert Hass，1941—　）的诗歌《春天》（*Spring*）。罗伯特·哈斯，美国诗人，其诗歌《时间与物质》（*Time and Materials*）于2008年获得普利策奖。

[32] 节选自华莱士·史蒂文斯的诗歌《纯粹的存在》（*Of Mere Being*）。

[33] 节选自D.H.劳伦斯（David Herbert Lawrence，1885—1930）的小说《查泰莱夫人的情人》（*Lady Chatterley's Lover*）。

[34] 引自黄克孙译本，台北启明书局，1956年版。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划


未讀
太阳系度假指南
VACATION GUIDE TO THE SOLAR SYSTEM
OLIVIA KOSKI & JANA GRCEVICH
GUERILLA SCIENCE
[美]奥莉维亚·科斯基 [美]加纳·格鲁赛维克 著
秦鹏 译
北京联合出版公司

版权信息

太阳系度假指南

Vacation Guide to the Solar System

作者：[美] 奥莉维亚·科斯基（Olivia Koski）
[美] 加纳·格鲁赛维克（Jana Grcevich）

译者：秦鹏

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

版权信息
作者的话
倒计时
做准备
    飞行前训练
    带些什么
    穿戴整齐
    太空飞行中有何期待
    健康
目的地：月球
    速览
    天气和气候
    何日启程
    漫漫长路
    到达之后
    何以代步
    有何好看
    有何好玩
目的地：水星
    速览
    天气和气候
    何日启程
    漫漫长路
    到达之后
    何以代步
    有何好看
    有何好玩
目的地：金星
    速览
    天气和气候
    何日启程
    漫漫长路
    到达之后
    何以代步
    有何好看
    有何好玩
目的地：火星
    速览
    天气和气候
    何日启程
    漫漫长路

- 到达之后
- 何以代步
- 有何好看
- 有何好玩
- 附近有什么

目的地：木星
- 速览
- 天气和气候
- 何日启程
- 漫漫长路
- 到达之后
- 何以代步
- 有何好看
- 有何好玩
- 附近有什么

目的地：土星
- 速览
- 天气和气候
- 何日启程
- 漫漫长路
- 到达之后
- 何以代步
- 有何好看
- 有何好玩
- 附近有什么

目的地：天王星
- 速览
- 天气和气候
- 何日启程
- 漫漫长路
- 到达之后
- 何以代步
- 有何好看
- 有何好玩
- 附近有什么

目的地：海王星
- 速览
- 天气和气候
- 何日启程
- 漫漫长路
- 到达之后
- 何以代步
- 有何好看
- 有何好玩

附近有什么
目的地：冥王星
速览
何日启程
漫漫长路
到达之后
何以代步
有何好看
有何好玩
附近有什么
回乡
致谢
参考
返回总目录

注意！

ATTENTION

就是现在，
离开地球表面！

【本书使用说明】

这是一本献给好奇太空旅行者的必备指导手册，包含旅程中你需要知道的一切信息。

星球概况｜八大行星＋卫星＋矮行星
基础知识｜飞行训练＋物资准备＋生活基本原理
交通信息｜飞行距离＋飞行时长＋代步工具
行程安排｜可游览的景点＋可以体验的项目
注意事项｜别让自己死在太空里

出发前，你要想清楚
自己是否打算回到地球


O2

献给维奥拉与詹姆斯，我的旅伴。

——奥莉维亚·科斯基

献给我的爸爸妈妈，

感谢他们唱了《我看到了月亮》（**I See the Moon**）给我听。

——加纳·格鲁赛维克

作者的话

AUTHORS' NOTE

自1972年以来，人类便没有再踏足过另一个世界（月球），有些人也许会因此而质疑，编写行星度假指南算不算明智之举。然而，如果你认为太空度假是一个遥远的幻想，可别忘了100年前飞机还是尖端科技呢。较快的飞机能以每小时200千米的“高速”飞行，在2571年内将一位具有远见的太空旅行者送到海王星。1989年，旅行者2号飞船以每小时6.8万千米的速度在不到12年的时间里抵达海王星。谁又能知道，再过100年，去一趟海王星需要多长时间？你们在太空里度假的曾孙，说不定会在某个古老的火星图书馆里发现这本书，看着我们对未来的天真憧憬露出微笑。

假如我们没有先把自己消灭掉，人类总有一天会飞到我们在本书中描述的地方。这一点几乎毫无疑问。有了合适的资源，以及最重要的意志，我们可以游历遥远的世界。我们讨论的一些情景，比如人类探访月球和火星，说不定会在未来几十年内发生。其他一些情景，比如找到办法让我们的身体承受住木星附近的极端辐射、水星向阳面的高温，或者进行一次前往太阳系外围的漫长旅行，则需要更长的时间。在某些情况下，我们可以继续利用探测器和机器人探险家来模拟体验不适于人类生存的遥远行星环境。

在内心深处，我们是一群太空旅游从业者。我们的工作是把太空度假的想法出售给你。根据关于每个目的地目前最可靠的信息，我们编撰了这份指南。这些地方我们一处都没有去过，不过放心好了，我们有很好的消息来源，足以证实我们对那些度假地点的描述十分准确。在这本书中，我们美化了其他行星和卫星上存在的建筑物、城市和其他人工基础设施。而事实上除了探测器、漫游车和轨道飞行器的残骸、月球上六面可能已经被晒成白色的美国国旗，以及一些微小的碎片，其他行星上没有人造物，人类也不曾踏足过月球之外的其他星球。你在本书中发现的任何一点虚构都以科学和技术专业人士提供的信息为依据，意在传达出你在假期中可能会有的真实体验。

你要如何分辨内容的真实与否？目的地的自然属性，比如温度、白昼长度、气候等，都基于最新的科学研究，我们依据物理学来描述事物的行为。我们提到的任务、探测器、着陆器和某些特定的漫游车都确有其物。我们描绘的地貌与实际情况相符，地理位置的名称主要依据国际天文联盟的标准。为了方便阅读，我们选择在可能的时候使用中文翻译。经常用于科学文献中的拉丁名一般列在括号里。我们也会对现实世界中并不存在的事物进行艺术处理，比如提及地下和空中城市，当地的

传说，租借漫游车、潜艇、飞艇、悬停汽车或其他游历异星地貌时会用到的交通工具，再比如能在某些极端环境中生存的可能性，或是你在太阳系中某些地点游历时所期待的轻松和惬意。

且不论蓬勃的创意，我们正处在太空探索热潮曙光乍现的时刻。2011年，游击科学（Guerilla Science）建立了第一个跨星系旅行社，为公众规划太空旅行。之后的短期内，人类对邻近行星的知识有了惊人的增长。科学界已经从冥王星、土星和木星带回了图像，并让一部机器人降落在了遥远的彗星上。人们还发现了数以千计的系外行星，也就是那些围绕着遥远恒星运转的神秘行星，而且每天还有更多的行星被证实。我们对其他世界的探索越多，就越能反思自己在宇宙中的位置。只要深入了解一下其他星球的环境和为了让人类在上面生存所必须采取的极端措施，任何人都能很快意识到地球是多么稀有和宝贵，而为了后代保护地球是一项多么迫切的任务。在太空里度假的目标与解决地球上社会、经济和环境等方面诸多迫在眉睫的问题并不矛盾，它甚至还能让人们更加懂得保护我们这颗星球，好让自己有家可回。

科学家们对地球以外的地方不断有着新的发现，而我们在努力研究如何保护已知的唯一适合人类生活的星球，与此同时，企业家们正在想方设法让太空度假成为现实。埃隆·马斯克（Elon Musk）的太空探索技术公司（SpaceX）向国际空间站运送货物，并希望最终将人类送到火星。其他公司，如理查德·布兰森（Richard Branson）的维珍银河（Virgin Galactic）和杰夫·贝索斯（Jeff Bezos）的蓝色起源（Blue Origin），都希望能够把大众第一次带到太空边缘。一家名为“世界观”（World View）的公司希望利用高空气球让游客一览地球的曲线，而由经济型旅店巨头罗伯特·毕格罗（Robert Bigelow）经营的毕格罗宇航（Bigelow Aerospace）则希望有一天能出租环绕地球运行的充气旅馆房间。这些公司都是真正的太空度假行业的先驱。亲爱的旅行者，你踏上行程只是时间问题了。

你的火箭飞船正等着呢。

倒计时

COUNTDOWN

站在母星的大地上，你可以仰望夜空，畅想一个充满了冒险的轻松而浪漫的未来。每一枚光点都是一个可能的度假地。你想去哪里？

你的旅程会把你带到离家几百万甚至几十亿千米的地方。我们在地球上对距离的理解远不适于领悟隔在你和假日美好之间的虚无。每一次旅程都是不同的，我们无法预测你将拥有什么样的旅程，但是我们可以保证，你永远不会和以前一样了，你的身体、你的人生观和你对宇宙的理解都将被彻底改变。

你将探访的地方既陌生又熟悉。以地球为中心的时空概念将让位给一个更宏大的物理秩序的韵律。白昼可能更长或更短。一年，也就是绕太阳运行一圈的时间，可能相当于人类一生的好多倍。那里也许没有可供立足的土地。当你在另一颗行星上攀爬巍峨的火山，在深坑底部仰望星空，或者在充满瑰丽云团的天空中穿行时，你在地球生活中所面对的忧虑将会消失。你会直面自身的无足轻重，并对之报以微笑。

别担心，我们会帮助你有型、有腔调地在太阳系里度假。这是一份关于非凡假日的普通指南。我们将从基础知识开始：训练、打包，以及微重力健康和生活的基本原理。然后，我们将详细探讨你的行程安排。我们将前往太阳系的所有行星和其他游览地点，从地球近旁开始，旅行到更远的地方。月球之后是水星、金星和火星，然后我们会去太阳系外围的巨行星，也就是木星、土星、天王星和海王星探险。最后，我们将抵达冥王星。它已经不再被归为行星了，但仍然是一处奇妙的度假地点。在这些书页中，你会找到最合适的动身时间、到达后会看到的景象以及该如何在那里消磨时间的建议。

当你在土卫六的甲烷湖里泛舟，在火星水手谷的悬崖上攀绳下滑，或者在遥远的木卫二潜入冰层下的海洋时，你将明白身为一个外星人意味着什么。毕竟，我们是为在地球上生存而生，没有什么比在空旷无垠的外太空里度过一个长假更能让你意识到自己的人性了。

做准备

PREPARING FOR YOUR TRIP

太空度假可不是一场说走就走的旅行，不可能今天做决定，明天就离开。你需要努力训练，轻装上阵，而且需要很大的勇气。无论怎么准备，你都不可能真正体验到第一次离开地球的感觉。不过，这正是你决定离开的原因。

飞行前训练 | **Preflight Training**

在地球上度过的时光塑造了你的身体。想要让它准备好经受太空旅行所带来的全新生理和心理挑战，需要付出极大的努力。积极锻炼吧。假如你能顺利归来，整个余生，你都会珍视自己这场旅行。出发前的一点辛苦，将有助于你在旅途中更好地放松、享受乐趣，而这才是更重要的事。

针对度假计划的训练需要几个月到几年不等，这取决于你想要去哪里。美国国家航空航天局（NASA）选拔宇航员的标准非常严格，休闲度假者并不适用。你在考虑自己的旅行时，可以把这些资格条件当作一份指南。不管你是否满足这些条件，我们都能找到让你去乐享假期的方法。

视力。每只眼睛的视力都必须校正到20/20（1.0视力）。过去，只有那些拥有完美视力的人才是太空旅行的候选者。但如今，激光手术能让更多的人满足这一条件。

血压。以坐姿测量，不超过140/90。在地球引力场中，你的循环系统推动血液抵抗恒定的重力。一旦这种向下的力缺失，你可能会感觉到血液在往脑袋里涌。出发之前，你的血压状况越好，你就越有可能在面对叹为观止的景点时不犯心脏病。

身高。站立身高在145cm～190cm之间。设计一个能够适应各种身高的座椅是很困难的，乘坐飞机的高个子就可以证明这一点。NASA的身高要求不像以前那么严格了，在20世纪60年代，宇航员的身高不得超过183cm。大多数美国职业篮球联赛（NBA）的运动员都无法成为NASA的宇航员，而这一点太糟糕了，因为在月球上扣篮一定会是无与伦比的体验。

军事水中生存。懂得如何穿着十几千克的战斗器具在水中生存，意味着你准备好了面对一次紧急迫降。

潜水认证。这项训练不是为了让你在珊瑚礁潜水，而是让你能在太空中行走。学习在水下呼吸压缩空气将使你习惯于在太空的真空环境中利用空气罐呼吸。

游泳测试。脚蹬飞行鞋和网球鞋，在25米的泳池中不间断往返。这项标准测试将确认你是否满足了假期的体能需求。

压力测试。在高压舱和低压舱承受不同的压力。在你的假期里，你的居所和宇航服将保护你免受危险的高压或者低压的伤害。在离开之前习惯巨大的压力变化将帮助你适应那种迷失方向的感觉。

重力训练。一天体验40次时长20秒的失重状态。飞机可以沿着巨大的抛物线轨迹飞行，从而在机舱内模拟微重力环境。当飞机沿弧线向下飞行的时候，你将有不到半分钟的悬浮时间。而在上升段，你体验到的重力将高于正常值。如果你能在所谓的“呕吐彗星”上挺过这种眩晕之旅，你就很有可能挺得过每天的失重。

中性浮力训练。水箱是在地球上模拟微重力环境的最好方式之一。你将带上配重，防止你上浮或者下沉。

带些什么 | What to Pack

你已经预订了行程，完成了飞行前的训练，是时候收拾行李了。除非你要到月球来一趟短途旅行，否则你需要准备离开家很长一段时间。仔细考虑你到底需要带些什么，因为发射成本并不便宜。你和你的行李必须以至少每小时27359千米的速度被射入太空，到达旅程的第一站——围绕地球的轨道。

美国的航天飞机还在服役的时候，把1千克重的东西送到距离地面400多千米的国际空间站上，平均花费超过22000美元。相比之下，一个50磅重的行李箱被航空公司收取40美元行李费（约合每千克1.8美元）似乎还不算离谱。虽然价格在下降，但即使是最富有的探险旅行者也必须尊重物理定律。你需要多带一双袜子吗？留在家里的每盎司都能为你节省625美元（约合每克节省22美元）。

以下是每位旅行者都应该考虑的一些基本物品：

尼龙搭扣。在你的小舱室里追逐过50次松脱的笔后，你会深切体会到自粘尼龙搭扣的价值。

强力胶带。阿波罗计划的宇航员曾经使用这种万能贴修理月球车上的挡泥板。

急救箱。除了基本的绷带、药物和软膏，你还需要外伤用品和手术用品。做好一切准备，搞不好你就是飞船上最有资格为旅伴切除阑尾的外科医师了。

毛巾。如果在微重力环境中出现了溅洒，你必须在水滴飘走之前及时捉住它们。

肥皂。你不会经常洗澡，但是如果你确实要带肥皂，一定要带固体的，因为液体肥皂在微重力环境中会变成一片狼藉。

面巾。擦掉脸上的油脂只会刺激皮肤分泌更多油脂，然而很多太空旅行者都受不了皮肤不干净。

干洗头粉。这种粉状物质可以吸收头皮上的油脂，且不需要浪费水。

衣服。一定要带经过处理的，可以减少细菌、气味和各种皮肤问题的衣服。

照相机。要是不能让地球上的朋友都嫉妒你的月球自拍，太空度假还有什么意义呢？买一部可以承受恶劣环境的耐用相机吧。

笔记本电脑。为避免出现故障，请尽量选用防辐射的型号。

牙刷和牙膏。你可以带上你的旧牙刷，但刷牙将是一个与你的习惯截然不同的过程。你需要在身旁放一个装满水的饮水袋。把牙刷弄湿，刷毛会吸水。加一点儿牙膏，从你的饮水袋中再吸一些水，然后刷牙并吞咽。在这个过程中，千万不要让任何东西飘走或者从你的嘴里跑出来。

内衣。没有什么比穿上新的内衣感觉更好的了。动身之前尽可能多地享受这个简单的动作，因为你在太空里更换内衣的次数会很少。日本宇航员若田光一曾穿着同一件浸银抗菌的内衣在国际空间站里待了两个月，什么问题都没有。

睡衣。为了调节温度以及保持心理健康，一套舒适的睡衣必不可少。

活动服。你需要经常锻炼，以免骨质疏松。

好看的礼服。裙子穿起来好看，但是你需要像电影《七年之痒》（The Seven Year Itch）中站在地铁下水道孔盖上方的玛丽莲·梦露一样不停地把它摁下来。

珠宝及饰品。如果佩戴珠宝，请一定要戴不会飘来飘去的，比如颈圈、耳环和用来光着脚显摆的脚镯。为了避免出现短路，请不要戴悬垂耳环、长项链或者任何由导电金属制成的东西。

纪念品。纪念品通常是在度假期间收集的，但针对太空度假而言，你应该从家里带，因为普通物品在太空里转一圈之后就会成为珍贵的纪念品。每位参观国际空间站的旅行者都会得到一个个人喜好包（PPK），3英寸（约7.6厘米）见方，可存放不超过680克的物品。它仅可以容纳纪念这趟旅行的珠宝、照片或标志。如果是较长的旅行，你的限额可能更少。

收拾行李的时候请记住，你在地球上享受的几乎无限的可呼吸空气在太空里是不存在的。你带的东西越多，留给提供水、空气和废物处理的生命支持系统的空间就越小。

穿戴整齐 | Suit Up

每个旅行者的行李清单各不相同，但是有一套装备是每一位太空游客都需要的——宇航服。太空对人体充满了敌意，而宇航服创造了一个适合我们生理结构的微型环境。它是一艘可穿戴的宇宙飞船。

每件宇航服都能够实现水循环、温度调节、供氧和屏蔽辐射等功能。一套好的宇航服也应该能够承受住微小陨石的轻微撞击，这些讨厌的太空小石子飞得比子弹还快，会对我们的生命安全造成威胁。

所有这些先进技术都是昂贵的。美国联邦航空管理局批准的舱外活动服成本至少在200万美元。仅仅为了维护现有的库存，NASA每年就要花费数百万美元。宇航服是模块化的，你可以和朋友共享零件，轮流穿戴，以便节省成本。根据你的行程，你可能需要一套单独的衣服来应对异星的空气、温度、压力和重力。

一个更舒适但还处于实验阶段的选项是紧身生物服。它不是用空气填充你和衣服之间的空间，而是以机电方式向你施加舒适的压力。电路织就的高级纤维在人体的移动过程中会以合适的力度挤压你的身体，这能够让你在真空环境中拥有最大限度的灵活性。

购买宇航服时，要特别注意尺寸是否合体，记得要在模拟广袤太空的真空室中测试全套衣服。移动时，它不应该造成任何挤压，不能像拐杖似的顶到腋窝。发生这种情况的部位叫作侵入区。裆部是最大的侵入区，尤其是对男人来说。穿上宇航服后，注意一下你的膝盖后面和肘部内侧的感觉如何，这些地方很可能是麻烦所在。

手套需要保证质量及舒适度，你的手腕应该能够自由活动。手指需

要插到手套顶端，同时手套不能抵在手指之间的皮肤上。确保手掌杆——防止手套膨胀成一个无用的球的构造——不挤手。利用性能测试测量你戴手套时的握力、精确度和力量。要想体会一下戴着这些东西是什么感觉，可以尝试用半充气的气球套住双手玩玩魔方。

太空飞行中有何期待 | What to Expect on the Spaceflight

也许曾经有那么一两次，你在飞机上不得不忍受哭闹的婴儿、粗鲁的乘客和狭窄的座椅。比起乘坐喷气式飞机，乘坐火箭飞船更令人兴奋，但也更难受。你将在新的环境中，与新结识的人一起，努力对付身体和日程的改变，而当这一切发生的时候，被你一直以来称为家园的那颗星球上令人欣慰的拉力将不复存在。

[重力]

从蹒跚着迈出第一步开始，你就已经直观地理解了生存在我们所谓的1G中是什么意思。地球对你——以及你对地球——施加的恒定拉力是我们所认为的“自然”引力。它是完全可靠的。如果你在纽约站到体重秤上，你可以肯定它得出的数字和你站在东京的秤上时一样——多少有点小误差，这取决于你这一路上有没有吃零食。在太空以及其他行星和卫星上，情况就不是这样了，你将会应对高重力、低重力、微重力以及人工重力。

[高重力]

当你冲上天空，开启你的度假之旅时，会被一股令人陶醉的力量压在座位上，它相当于地球重力的2～3倍。那种感觉就像是坐在了嘉年华会的大转轮上。你所体验到的大部分超重都是完全可控的，而且还挺好玩。不过，你有必要了解一下当加速度变得过大时会有哪些预警信号。

你的眼睛，尤其是视网膜，对于超重时血流的改变非常敏感。你眼中的景象可能会变得黯淡、失去色彩，就好像黑白电视机中的画面，这种现象被称为“灰视”。接下来，你会出现隧道视觉，它还可能出现视野更小的枪管视觉。下一个阶段是黑视，你将完全失去视力，最后，你会因为加速度引发的意识丧失而昏倒。不过，如果加速度增大得很快，你可能会在注意到问题之前就昏了过去。

请记住，不是所有的加速度都会以同样的方式影响到你。方向为从头到脚的力要比从胸部到背部的力更具破坏性，这就是为什么你的座椅靠背在发射过程中会与地面平行。

你可能需要在出发前几周练习对抗加速度的紧绷动作。收紧手臂、腿、胸部和腹部的肌肉。深呼吸，念出“hick”这个单词，闭合你的气道。在接下来的3秒内，用力绷住，然后快速呼气。重复这个过程。在

超重的情况下，当你的大脑需要血液来保持意识清醒时，这个动作有助于防止血液汇集到身体其他部位。

[微重力]

发射大约10分钟后，火箭就会停止推进，你的感觉会从重如泰山变成轻如鸿毛。一旦安全，你就可以解开安全带，飘离座位。欢迎来到失重状态。

在环绕地球的轨道上，你处于微重力环境中。这并不意味着一旦离开大气层，地球的重力就消失了。在大约400千米——差不多为纽约和华盛顿之间的距离——的高空，引力仍相当于地表上的90%。如果能建造出一座那么高的塔，而你不小心在上面踩空，你仍会像石头一样坠落到地面上。但是因为你和你的飞船在以超过每小时27000千米的速度围绕地球飞行，你并不会在坠落时撞到地球。同样，因为你和你的宇宙飞船以同样的速度坠落，你会感觉自己失去了重量。

微重力会对你的身体造成奇怪的影响。在进入太空的最初几天里，你可能会患上“胖脸鸡腿”综合征。你的脸颊会膨胀，腿会变得更细，因为你的身体为了对抗重力作用，会努力将流体向上推。如果你还想长高一点，这里有个好消息——你确实会长高，因为你的椎骨之间的空隙会因为充满了液体而扩张。

[低重力]

你将要拜访的几个星球的重力都比地球小。在一个球下落的初始速度没那么快、高尔夫球打出400米也没什么了不起的世界里，当你学习走路、跑步，进行日常活动的时候，你会感到下盘发飘，没那么容易保持平衡。接抛球的杂耍和跳跃这样的普通活动变得非同寻常，在一些小行星和彗星上，你可以一跃不复返。

[人工重力]

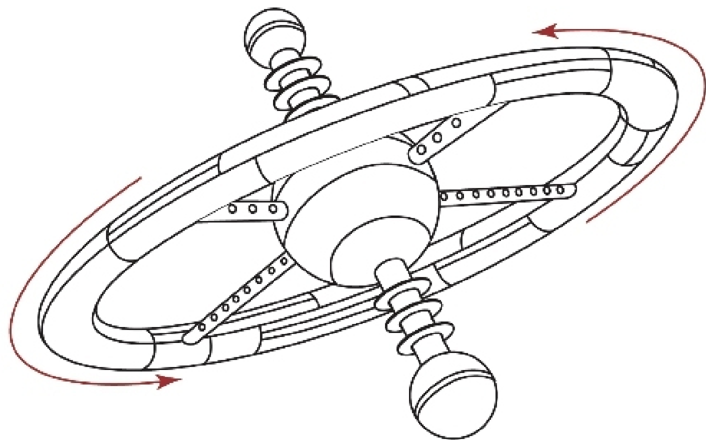
无论是虚无的太空，还是其他行星或卫星，似乎都无法为人类提供合适的重力。高重力会扰乱你的感官，有可能造成伤害。在低重力的卫星上长时间停留会削弱骨骼的力量。在外太空的自然微重力条件下，你需要每天锻炼两个小时，以免肌肉萎缩。

如果不想做这些练习，你还可以选择人工重力。它的工作方式很简单，你需要让宇宙飞船像巨型旋转木马一样旋转起来。旋转的航天器的外缘相当于人工重力家园的地面，重力的强度则取决于宇宙飞船的大小和转速。

最高质量的人工重力在你的头顶和脚趾上造成的感觉是一致的。获

得这种自然重力感的最好方法是让巨大的飞船以难以察觉的低速旋转。较小（也因此更便宜）的设施可以用更高的转速弥补它们尺寸上的不足，但这会让许多人眩晕。如果你不想让自己的骨头酥掉，你需要偶尔体验一下人工重力，或者直接花更多的钱进入大型飞船。

NASA 早期旋转空间站概念图。



健康 | **Health**

你无法预测到自己对新时区、新美食和新气候的适应情况。在失去了方向感的环境里，诸如睡觉、吃饭、如厕这样看似简单的任务，也会让人感觉难以搞定。当进行一次简单的太空行走都需要认真练习填充空气罐、检查控制系统、检查宇航服有无泄漏时，休息、补充营养和锻炼是必不可少的。疾病造成的失误事关生死。

太空病

几乎每个要去太空的人都会感到不安。即使你拥有一个能在地球上“乘风破浪”的铁胃，你也很可能摆脱不了太空病。在发射前，你需要确保自己的胃里有一些蛋白质，并把自己绑得尽可能紧。进入太空的头几天里保持头部静止，面朝同一个方向。在你的神经系统适应新情况之前，不要去做无重力翻滚。太空病药或者贴片也有帮助，抗组胺药也行。不要因为携带了呕吐袋而感到羞愧，没有什么比清理飘浮呕吐物更糟糕的了。放心吧，你并不孤单，许多职业宇航员也在太空中吐过。

[食品和营养]

坦白说，在太空里吃饭并不是一种愉快的经历。低重力引起的鼻塞会干扰你的嗅觉，你会像感冒时吃东西一样味同嚼蜡。不过别担心，你很快就会习惯吃成袋的补水食品了。在饭菜中加入辣酱可以改善口感。你甚至可能开始盼着吃些昆虫，它们是高效的蛋白质来源，你可以选择在长途太空飞行中进行养殖。在特殊的场合下，你可能会吃到多汁的温室西红柿或脆莴苣头，但是大多数时候，你只能吃热量很高的压缩食物。你需要服用维生素来弥补有限的饮食品种。

在太空里做饭是一个棘手的难题。明火和电炉在低重力条件下是不安全的，因此你的选择只剩下微波炉和感应炉了。你需要练习在摄入补水食物和饮料时不制造混乱，避免那些食物碎屑和液体飘进你的眼睛或者电子设备里。

在你的飞行途中，饮用水、清洗用水、刷牙用水，甚至如厕时排出的水都可以通过蒸馏系统得到处理和再利用。你排出的汗水和呼出的气息增大了飞船内的湿度，也能通过冷凝成为飞船循环供给的一部分。定期检查这些系统是很必要的，因为没有人喜欢喝味道像尿一样的水。

[睡眠]

在太空里睡觉是一件不寻常但又有助于恢复体力的事情。许多资深旅行者声称微重力是最好的床垫。你不需要枕头，可以在飞船里的任何地方休息。一面合适的墙壁，加上防止你乱飘的睡袋和捆扎带，是你安顿下来度过长夜的全部所需。没有了上和下的概念，你可以以任何姿势入睡。你的手臂可能会自然而然地向前伸，摆出僵尸的姿势，你的头也会稍微向前倾斜。在这里需要提醒一下那些容易入睡的人：感到疲倦的时候，一定要把自己固定在一个稳定的物体上，否则你很可能会飘走、碰到头。

闭上眼睛入睡时，你可能会注意到明亮的闪光。那不是狗仔队，而是一束穿过你眼球内部的宇宙射线。它会令人不安，但你可以这样安慰自己：这些粒子中的一些从遥远的星系飞来，只是为了在你的脑壳里消逝。

一条关于亲密关系的简短提示：你原本轻车熟路的活动到了太空里可能会变得不好办了。在轻轻一推就能让你飞走的情况下，你需要找出耳鬓厮磨的最佳方式。许多人因此变得沮丧，宁愿独自睡觉，但你最好还是把它看作一项令人兴奋的新挑战。

[视力]

微重力会对你的眼球造成不好的影响。你的视神经肿胀，压迫眼睛后部，造成轻微的视力模糊。与身体形状上的其他变化不同，即使你回到了地球，你的眼睛也会保持着它的新形态。在严重的情况下，你可能需要进行视力矫正。

别管是因为“眼睛里进了东西”还是惯常的存在主义恐惧，每个人都需要偶尔痛哭一场。泪水不会成滴地下落，而是在你的眼睛里积聚。如果发生这种情况，不要担心，只要把泪珠轻轻擦掉，享受宣泄。

[卫生用品]

尽管在飞船的过滤空气中——温度保持为令人舒适的22摄氏度——你不会出太多汗，但你还是需要重新考虑个人卫生标准。衣服在太空中不会像在地球上一样容易变脏，这很好，因为你需要多穿一阵子。在任何长途旅行中，你都应该尽可能少地用到水和湿毛巾，或者干脆长时间不洗澡。如果你不洗澡，大约5天后，你的衣服就会被分泌物浸透，不能再吸收了，你的皮肤开始变硬、发臭。但幸运的是，人类的嗅觉非常善于适应。

虽然你会想要换衣服，但那样做只会刺激你的皮肤分泌更多油脂。你要尽可能地压制这种冲动。大概8天之后，你就会适应，不会再闻到这些难闻的气味了。一旦你的衣服不能穿了，你可以像国际空间站上的宇航员所做的一样，把它们扔掉便是。

[如厕]

在太空里上厕所需要一些练习，因此你要准备迎接一段时间的如厕训练。低重力厕所会采用抽吸的形式，将排泄物安全带走。液体将进入水回收系统，固体将被排出。如果你在长途旅行中自己种植食物，你的固体废物就可以变成肥料。你可能会发现，没有了重力的帮助，五谷轮回所需的时间要比在地球上长一些。

[心理健康]

身在逼仄的空间中进行一场长时间的航行，每个人都会发现自己经受着极限的考验。如果你不知道自己能否撑住，你可以尝试一个叫作SUBSCREEN的评估。20世纪80年代以来，美国海军一直在用它测试，看看潜艇艇员是否适合在海洋底部待上几个月。不用担心，参与测试的人有97%的通过率。不过，定期的心理健康检查是至关重要的，因为长途旅行会对你的大脑产生奇怪的影响。

[辐射]

国际空间站里的宇航员主要靠地球磁场抵御空间辐射。空间辐射会改变你的DNA，从而损伤细胞，并进一步引发癌症。它甚至可能引起严重的大脑损伤，这种情况被称为“太空脑”，其症状包括焦虑、抑郁、决策困难和记忆障碍。如果你注意到某位同伴的行为开始变得不正常，可能是时候进行检查了。避免任何潜在伤害的最好方法是确保你拥有防护良好的飞船和宇航服，或者干脆待在家里。

[死亡风险]

在太空里有很多种死亡方式，离开地球前最好把事情安排妥当。

以下是部分风险清单：

缺氧。你的身体需要持续不断的氧气供应，红细胞需要用它来产生能量。其他行星上有氧，但并非可呼吸的形态。

减压。快速减压很可能是致命的。

有毒气体。许多行星和卫星的大气会刺激皮肤或造成可怕的灼伤。

活活烧死。太空中的飞船发生火灾时，乘员往往无处可逃。

坠落。在微重力环境中坠落并不危险，因为并不存在上和下的概念，但若是在低重力环境中，坠落也会造成伤害。

被意外地遗忘在某处。紧急疏散偶尔也会发生，有时候少数人的需要不得不让位给多数人的需要。

食物耗尽。粮食在太空和异星环境中难以生长，你几乎没有让自己出错的空间。

冻死/体温过低。许多人会把寒冷的气候和外太阳系联系在一起，但是在无空气环境中的背光区域，哪怕是在太阳附近，温度也会迅速下降。

骨质流失。如果不经常锻炼，你的骨骼会逐渐变得脆弱。

爆炸。小型爆炸也能很快升级为一场毁掉飞船的灾难。

核事故。在前往外行星的长途旅行中，你需要依靠核动力维持光照，其间有可能发生事故。

小行星撞击。希望你足够留意周围的环境，能在小行星撞到你之前就发现它们，不过，太空里总是充满了意外。

目的地：月球

DESTINATION-MOON

太阳系内有那么多卫星（moon），但只有一颗的英文名使用了这一类天体的统称，那便是地球的卫星：月球（Moon）。它形成于我们这颗星球历史的早期。当时一颗火星大小的岩石撞上了地球，熔化的岩石被这场灾难性的撞击抛入太空，演变成环，并最终形成了一颗从那时起就一直绕着地球运行的卫星。[1]

在地球上仰望天空时，你会经常看到月球，但游客们在体会到它真正的异星本质时，还是会大吃一惊。用阿波罗计划宇航员巴兹·奥尔德林（Buzz Aldrin）的话说："没有什么东西能让我准备好面对那严苛的地貌。那里荒凉贫瘠、起伏不定，地平线比我习惯的近得多。"

月球往往是更长旅程的第一站，它可以让人们初步体验低重力的奇怪世界和在真空的太空中旅行的挑战。值得一提的游乐项目包括：参观令人深感自身渺小的月牙形地球景观，乘坐月球车参观静海里颇具历史意义的阿波罗11号着陆点，以及挑战自己——在一个没有空气且你的体重约为故乡六分之一的地方练习走路和运动。

速览

AT A GLANCE

直径：地球的27%

质量：地球的1%

颜色：月球灰

绕地球运行速度：大约每小时3680千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的10千克重力

空气成分：痕量氦-4、氖-20、氢和氩-40

构成：岩石

光环：无

温度（最高、最低、平均）：116摄氏度、零下179摄氏度、零下20摄氏度

一日长度：708小时54分钟

一年长度：1个地球年

绕地球运行周期：大约27个地球日

与太阳的平均距离：1.5亿千米

与地球的距离：35.7万～40.7万千米

旅行时间：3日

向地球发送信号的时间：1.3秒

季节：难以分辨

天气：无

日照：差不多和地球一样，但是光线更加强烈

独特景观：南半球的第谷撞击坑

适宜：短期度假

天气和气候| WEATHER AND CLIMATE

月球上没有大气，因此也没有天气，许多游客都觉得安静的环境相当令人放松。你不必考虑季节，月球的自转轴只倾斜了1.5度，几乎可以忽略不计。无论你身在何处，一年到头的光照总是保持不变。你不会遇到意想不到的风暴，但温度的起伏很剧烈，白天可达116摄氏度，到了晚上则直降至零下179摄氏度，这使得收拾行李成了一件令人头疼的事，就好像是要去地球上最热的沙漠里远足，中间还打算在南极过一夜。但幸运的是，这种温度的大起大落每14个地球日才会发生一次，你有足够的时间适应新的环境。虽然太空本质上就是个寒冷的所在，无论走到哪里，你都可能遭遇破纪录的寒潮，但月球上的低温可不会逊色于太阳系里的任何一个地方。这是冥王星级别的寒冷。喜欢这种把人冻成冰疙瘩天气的人可以前往月球南极，那里的环形山太深了，阳光根本照不到那里。

如果你喜欢不高不低的温度，最好选择在黎明时分外出冒险。只是要小心——有时月球上黎明时分的静谧会被月震打破，那是冰冷的月球外壳两个星期以来第一次被太阳照射时升温造成的。这种月震以及其他始于月表以下很深处的震动，或者由陨石撞击引起的月震，大多温和无害。源自月表以下十几到三十千米的浅层月震则可以震响沉重的家具，造成建筑物的晃动。因为月球上的极度干燥和寒冷，物品发出的声音如洪钟一般，而月震可以持续十分钟之久。如果你发现自己遇到了月震，不要惊慌。保持冷静，尝试享受那种摇摆。

要想获得完整的月球体验，请务必待够一个月球日。这个时间要比听起来长，月球上的一天相当于30个地球日。这将给你足够的时间来探索月球正面和背面。

何日启程| WHEN TO GO

如果你还没有去过月球，应该马上就去。合上这本书，给你们当地的星际旅行社打电话，预约旅行。你还在等什么？没有比现在更合适的时机了，因为月球正以每年3.8厘米的速度远离地球。再等8年，你就要多走30厘米了。

去一次月球相当于环游世界10次，因为这正是你抵达那里需要飞过的距离。火箭飞得比飞机快得多，几天之内你就能到达月球轨道，对着一百多千米以外的灰色月面惊叹不已。如果有什么地方你想趁着有太阳的时候看，就得提前计划一下，因为月球的夜晚太长了。如果待足一个月，你肯定可以看到自己最喜欢的景点在阳光下的样子。请对照你的行程单检查一下光照情况。

你的月球之旅始于太空港。太空港就像机场一样。大多数情况下，你会从发射台而不是跑道出发。它们往往位于沙漠或水体附近，以防火箭在起飞时爆炸或坠毁。你可以在出发前先去发射场附近来一趟假日郊游，毕竟它们一般都选在天空晴朗、天气平静的地区。这可能是你对地球的最后记忆。

你需要达到每秒11.2千米的高速，即地球的逃逸速度，才能够摆脱地心引力的束缚。要想做到这一点，你将被捆绑在一次（但愿）受控的爆炸中。假如你打算飞到太阳系边缘，那么从地球表面发射升空几乎就要耗费全程所需能量的一半。这就是宇航员们那句话的来历："进入轨道就算是走了一半。"你可以选择靠近赤道的星际航班，以便节省开支。在那里向东发射，可以从地球的自转借力。

喷气发动机非常适合把你从地球的一边带到另一边，但是它们所需的恰好是太空里缺乏的东西——空气，特别是空气中的氧气。很多飞船的化学火箭燃料会自己供应氧气来产生推力。对于短途的月球之旅，你一路都不必担心燃料。要是前往更远的地方，你可以在许多类地世界中获取化学火箭燃料的基本成分，这也就意味着你不必备上所有的燃料。

把第一批人类送上月球的电脑远不如你的智能手机强大。这趟38.4万千米的旅程需要3天，但是如果你只是路过而不停下，就可以在9个小时内抵达。前往月球时你很难迷路，因为从地球上就能看到目的地，这是个只需将船头对准正确方向的简单问题。

途中需要留心范艾伦辐射带，这一区域内满是被捕获的粒子。这些粒子对人类没有什么伤害，但有可能严重损害你的电子设备。地球的范艾伦辐射带主要分为两个部分：一个距离地面600千米～9000千米，另一个距离地面13500千米～58000千米。阿波罗任务的科学家起初担心它们可能会影响宇航员的健康，但是飞船上的辐射探测器表明，穿越过程中的辐射水平仍然处在安全范围内。不过，你们也许想借此看看哪位旅伴在穿行过程中屏住呼吸的时间最长。



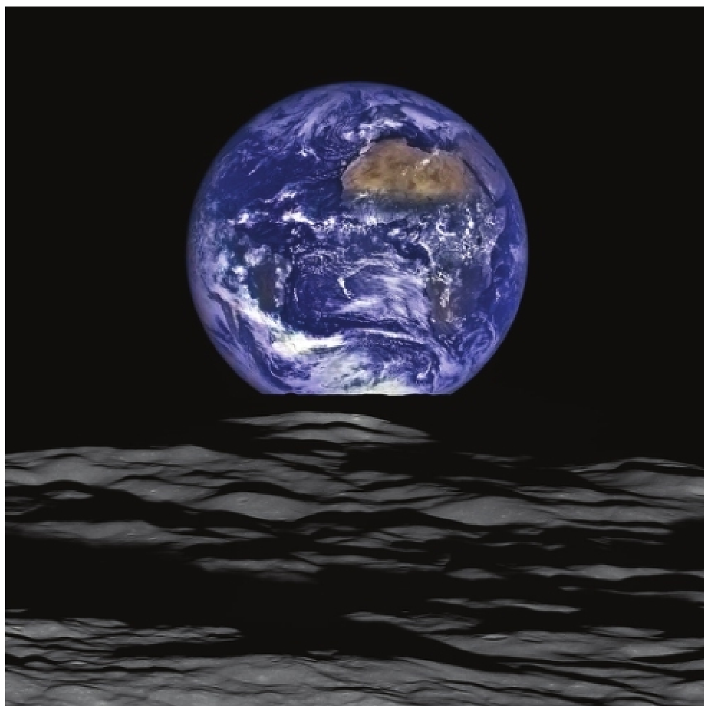
到达月球轨道后，你就可以参加开香槟的传统庆祝活动了。小心一点，在宇宙飞船的低压环境中打开一个瓶子很可能是危险之举，要留心从瓶口里高速冲出来的瓶塞，以及不可避免的飘浮泡沫团。

到达之后| WHEN YOU ARRIVE

许多人发现，在与月球的第一次亲密接触中，他们体验到了一种混杂着似曾相识和恍若隔世的愉悦感受。人类所熟悉的那些月球特征慢慢化作广阔而黑暗的平原、宽广的撞击坑和山脉。抵达后，有一些游客会停留在月球赤道上空的低轨道上。不要急于着陆，许多风景远观效果更佳，而且之后你还会有足够的时间去抵近探索。

还有一些游客会选择最省钱的方式——乘坐太空电梯——抵达月表。你将在一个远离月球的地方出发，那里叫作地月拉格朗日点，也叫L1。L1位于地球和月球的轨道之间，但是更靠近月球。在那里，地球和月球的引力共同创造了一个相对于月球保持位置不变的轨道。通过一根超长的强力缆绳，月球太空电梯将位于L1的空间站与月表连接起来。你将带着随身物品进入电梯间，然后慢慢降到月面。比起乘坐火箭，太空电梯的效率更高，成本也更低，但它有可能因为遭到微陨石的撞击而毁坏。

如果你到达的是月球对地的一面，不要忘记回头看看你的家园。初见此景的人，在凝视着那颗悬在黑暗中的纤巧蓝色弹珠时，都会产生强烈的敬畏与震撼。在这里拍照需要动用你的智慧，也许可以尝试摆一个把整个地球握在手中的姿势。



你启程之前去过的所有地方的照片。

美国国家航空航天局 / 戈达德太空飞行中心 / 亚利桑那州立大学

入住酒店时，请务必选择一个能够看到地球的房间。这样你就能观赏地球的美，无论它是被完全照亮，是像一抹新月似的闪闪发光，还是通体漆黑地镶嵌在熠熠群星之中。月球总是用同一面对着地球，因此地球永远不会离开你的窗户。有报告称，月球上存在着只在地相圆满时出现的狼人，但那都是夸张的说法，就像那条名为“Pahasydämiset”的流浪多头蛇也并不存在一样。（这一传说起源于一个晦涩的芬兰民间故事，据我们所知是捏造的。）在地球渐圆的过程中，你可以尝试寻找人类的文明之光以及地球阴影中的大陆轮廓。

安顿下来之后，你需要熟悉旅游礼仪和规范。绝不要锁上建筑物的气闸。万一你被困在外面，宇航服上的一个小洞就足以危及你的生命，考虑到这一点，这项规定可谓生死攸关，必不可少。此外，水是很宝贵的，哪怕些微的浪费都会被视为不可原谅的罪行。提防那些试图卖给你月球土地的人。别管他们怎么说，这里的土地是不能够买卖的，那些人只是在图谋诱使你陷入房地产骗局。

何以代步 | GETTING AROUND

不再受制于强大的引力意味着可以不拘泥于传统的地面旅行方式。

任何人都可以租一辆漫游车，但是那些真正懂行的人会选择跳跃机。乘坐跳跃机游历月球不仅是一种难忘的有趣体验，还会让你在长途旅行中提升效率。跳跃机看起来就像最早的阿波罗月球着陆器，有四条腿和一个安放座位、货物和燃料的区域，配备着铰接支柱和弹簧，电源能够积攒能量，然后突然释放，让跳跃机猛地弹起来。在没有空气阻力的情况下，你将沿着一条大弧线越过月表，一跳的距离短则100多米，长可达近500千米。你在月表移动的速度将取决于跳跃时的电力，以及当地的月表重力。进行长途旅行时，你需要在地图上规划好停车站，以便为燃料电池补充氢气和氧气。

如果你喜欢乘坐漫游车旅行，那就要准备好以悠闲的高尔夫车速缓缓横跨月表。月球漫游车速度表的最大刻度只有20千米。如果以每小时16千米的速度不停行进，你可以在大约28天内环绕月球一周。

由于没有大气，你不可能进行飞机旅行。任何飞行都需要火箭动力。当你准备离开时，返回轨道的花销可不算便宜。你需要达到每小时8529千米的速度才能摆脱月球引力。

有何好看| **WHAT TO SEE**

[月球正面和月球背面]

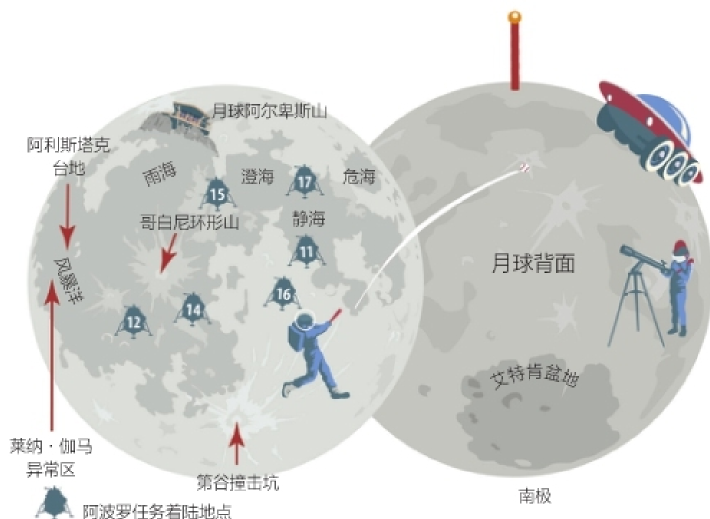
别管平克·弗洛伊德（Pink Floyd）乐队怎么说，月球是没有阴暗面的。[2]和地球一样，除了极点，月球上的任何地方都有规律的日夜循环。白天阳光灿烂，天色乌黑，几乎看不到星星。在月球的夜晚，你看不到太阳，但是天空中群星璀璨。

月球没有永恒的阴暗面，然而由于潮汐锁定，它有一面永远背对着地球。地球的引力并非从前到后均匀一致地作用在月球身上，因此月球被拉长，两侧凸起。随着时间的推移，地球对凸起部分的拉动减缓了月球的旋转，所以在地球上只能看到它的一个面。就像一位想把什么东西藏在身后的朋友一样，月球侧身掠过地球的天空，从来不肯展示自己的背面。在月球成为热门度假地之前，关于它的另一面可能隐藏着什么，流传着一些乱七八糟的说法，时至今日，那里仍然保持着某种神秘氛围。

你会注意到月球正面比背面分布着更多的平坦区域，这些区域叫作“海”。月球形成后，地球保证了其正面的温暖和表面之下的熔融状态。小行星撞上月球正面时，熔岩喷射出来并冷却形成平原。[3]海的图案构成了月球的面貌。如今，你终于可以抵近欣赏它的容貌了。

月球背面没有正面那样的海，而是到处分布着撞击坑。据阿波罗宇航员威廉·安德斯（William Anders）说，月球的另一面“就像我的孩子们刚刚玩过的沙堆”。它嶙峋的模样并不是因为遭遇了比正面更多的太空

碎屑，而是因为熔融表面凝固得比正面快，使得较古老的环形山得以保留下来供你欣赏。你在月球背面看不到地球，而这正是有些人喜欢去那里的原因。



[历史遗迹]

历史爱好者将欣赏到6处阿波罗登陆地点，特别是阿波罗11号登陆澄海的地点。一定要去探访保存完好的第一批人类足迹，那是宇航员尼尔·阿姆斯特朗（Neil Armstrong）在1969年时留下的。令人惊奇的是，到访月球的第一批游客飞过了38万多千米，结果在月球上的活动范围还不到一个棒球场大。他们只停留了22个小时，在外面花了两个半小时踢土、练习走路、收集带回家的石头。他们立下的旗帜在离开时就倒下了，之后又被阳光和辐射照成了白色。后来的阿波罗任务拜访者有了更多的机会真正当一名游客，比如练习打打高尔夫球。

中国的“嫦娥”探月计划留下了另一处历史遗迹。名为“玉兔”的漫游车探索月表长达31个月，之后在微博上实时播报了自己的死亡。它最后的消息是：“晚安，地球。晚安，人类。”你可以在雨海参观它的长眠之所。

[月球博物馆]

月球博物馆是一块小小的陶瓷片，尺寸约为2厘米×1.3厘米，上面印着20世纪几位流行艺术家作品的微缩黑白版本，这些艺术家包括约翰·张伯伦（John Chamberlain）、福里斯特·迈尔斯（Forrest Myers）、大卫·诺夫罗斯（David Novros）、克拉斯·欧登伯格（Claes

Oldenburg）、罗伯特·劳森伯格（Robert Rauschenberg）和安迪·沃霍尔（Andy Warhol）[4]。这个颠覆性的“博物馆”未经NASA的正式批准，就被偷运到阿波罗12号飞船上并送到了月球。一般认为，它至今仍留在阿波罗12号的遗址中。

[风暴洋]

只有风暴洋面积大到了可以被称为“洋”而不是“海”。参观完阿波罗12号和14号着陆点后，你可以前往神秘的莱纳·伽马旋涡。这片70千米宽的地貌是个明亮的白色斑点，形状类似蝌蚪或者被倒进咖啡的奶油。这里是月球的“51区”[5]，月球磁场在这里出现了奇怪的扰动。人们普遍认为是磁场强度影响了到达月表的辐射量，从而促成了这一地貌的形成。莱纳·伽马旋涡还是月球暂现现象发生最多的区域之一。这种现象是指奇怪的闪光、颜色变化，以及其他短暂的突发事件，在过去的至少一千年里，地球上一直有人观测到这种现象，虽然无法确定哪些事件确实发生过。科学家认为其中一些闪光与从月球熔岩管中逸出的气体及该地区的其他地质活动有关。

离开风暴洋之前，你可以到位于东部的哥白尼环形山稍做停留。它的中央峰引人注目，山环复杂且分层。它有60千米宽，但并不算深。如果你把哥白尼环形山看成一个直径23厘米的馅饼盘，那么它只有0.85厘米深。

[阿利斯塔克台地]

在风暴洋的北边，是被称为“木斑”的阿利斯塔克台地，它是以古希腊著名的天文学家阿利斯塔克（Aristarchus）的名字命名的，他是第一个公开提出以太阳为中心的宇宙模型的人。位于阿利斯塔克台地中部的区域有很多石块，这里被称为“眼镜蛇头”，或亮或暗的岩石分布在斜坡上。从眼镜蛇头开始，延伸到台地一侧的是施勒特尔月谷，它由熔岩形成，状如蛇形，长140千米。如果没有参观著名的阿利斯塔克陨石坑，你在这一地区的旅行就称不上圆满，那里的明亮与台地的黑暗形成鲜明对比。陨石坑中富含的钛铁矿物，可以被开采出来并提取用于火箭推进剂的氧气。

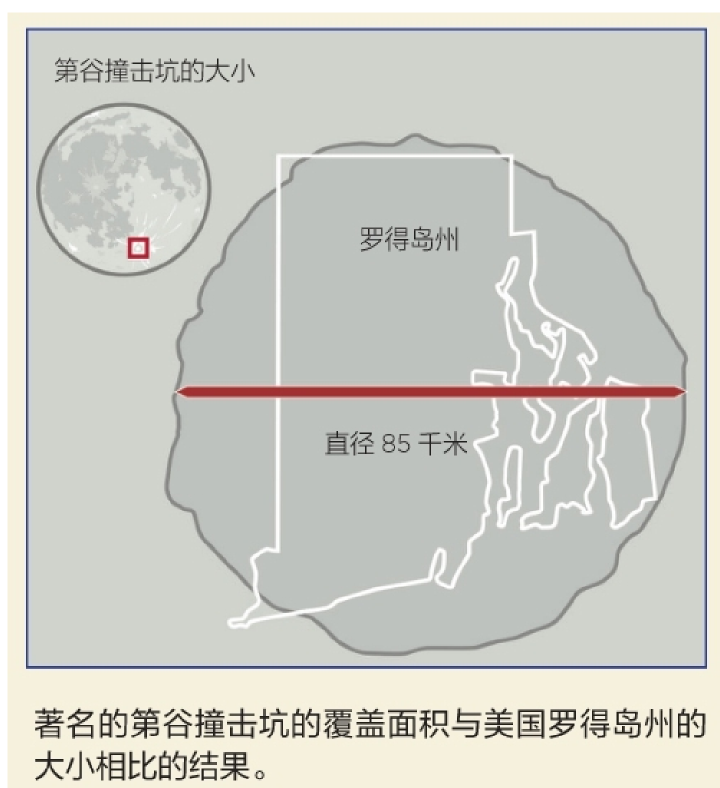
[东海]

阿利斯塔克台地西部，横跨月球正面和背面的是东海。它就像一个明暗相间的圆环箭靶。这种结构的形成是由于巨大撞击坑中的熔岩冷却并硬化成光滑的表面，那些涟漪是同心的山脉，最中间的是内卢克山脉，然后是外环的外卢克山脉，最后是科迪勒拉山脉。虽然地形崎岖不平，但很多人都会来到东海进行一次朝圣之旅，从科迪勒拉山脉的外环出发，一步步走向内部的靶心。没有大气，也就没有声音，这一点更增强了冥想者的静默体验。

[第谷撞击坑]

第谷是月球上最具特色也最拥挤的旅游景点。破碎的月岩排列成放射状，就像明亮的光芒一般排布在这个位于南半球的圆形大坑周围，即便在地球上也很容易看到。这个撞击坑非常受欢迎，以至于1895年，作家托马斯·格温·埃尔格（Thomas Gwyn Elger）将其称为“月球的大都市撞击坑”。它是在约1.9亿年前经由小行星撞击而形成的，如果你曾在恐龙时代四处漫游，就可以在地球上看到它被击中时月面上明亮的闪光。

在它的北缘住下，你就可以放松下来，欣赏85千米宽的撞击坑美景。它的底部非常适合来一场80千米的超级马拉松。撞击坑的边缘是深色的，那是因为月岩在陨石的撞击过程中熔化，重新凝固成了一层薄薄的玻璃状物质。你可以在地面上收集一些“月球玻璃”带回家作为纪念品。许多游客会选择沿着它蜿蜒曲折的山坡，徒步5千米，从山顶走到山下。如果沿着东边的之字形路线，你可以在大约1个小时内下去。



著名的第谷撞击坑的覆盖面积与美国罗得岛州的大小相比的结果。

因为重力小，在月球上沿路闲游是一件悠闲的事，你的星际旅程将有一个温和的开端。你不必担心疾风扑面或者撞上昆虫，这两样东西你在月球上都找不到。一旦你到达了底部，就该重新开始攀登了。在第谷中部的山峰上，你可以观赏到撞击坑和边缘地貌的壮阔景象。

[南极]

参观完拥挤的第谷后，你可以选择向南旅行到艾特肯盆地。它覆盖了月球背面南部的很大一部分地区，是太阳系中最大的撞击坑之一，峭壁直降十几千米，底部延伸2500多千米。

盆地内有莱布尼茨山脉，山脉的最高峰有8200多米高，仅比珠穆朗玛峰低了几百米。在它陡峭的悬崖上，你可以俯瞰整个南极地区。尽管在低重力环境中，它比地球上的姊妹山更容易征服，但在尝试沿着巨大的山坡登顶之前，你必须接受训练。到了月球上，令攀登高峰的旅行者备受困扰的高原病不再是风险，每个人都需要携带充足的可呼吸空气。

经过艰苦的徒步抵达莱布尼茨山脉的顶峰后，你可能想在极地的某个永久阴影区域内休息一下。这些区域位于某些撞击坑的底部，没有阳光能够照射进去，因其极端寒冷、黑暗和稳定而极富价值。它们被称为“永恒黑暗的撞击坑”。阴影区域可以用来存储推进剂和其他补给。对那些安排了遗体低温保存的人而言，这里是理想的墓穴，因为它能提供永恒的自然冷藏。

在南部旅行时，不要错过沙克尔顿撞击坑。它的底部是一个永久阴影区域，边缘却有许多山峰一直沐浴在阳光中。如果想探索里面更小的撞击坑和山峰，你就必须带上一个跳跃机，因为漫游车无法急降到底。

[月球阿尔卑斯山和雨海]

月球上的阿尔卑斯山位于雨海的东北边缘，因其稀有的美而独树一帜。你可以从阿尔卑斯山北部古老的柏拉图撞击坑开始你的旅程，在它的盆地里，还有一些更年轻的小撞击坑。你可以从那里驾驶着月球车一路向南，抵达宏伟的阿尔卑斯山。接下来，你可以参观阿尔卑斯月谷，它绵延穿过山脉，连接着雨海和冷海。

月球阿尔卑斯山的最高峰之一是勃朗峰，这是一个有着法国特色的名字。地球上的勃朗峰位于法国和意大利的交界处，月球上的勃朗峰则位于阿尔卑斯月谷的西端以南。它的顶峰比周围环境高出3800多米。勃朗峰的山坡并不陡峭，但是要想登顶，还是需要一个地球日的漫长攀爬。因为太阳每次升起14个地球日，你应该能够在月球日落之前抵达。从勃朗峰出发，我们会推荐一个向西的短途旅行，目的地是皮顿山——一座位于雨海平原的山峰，虽然不大，却很显眼。你在那里练习过攀登之后，就要向南到亚平宁山脉和月球上的最高峰——惠更斯山。这座山峰拔地而起，高5500米，在这里，你可以磨炼月球登山技艺。

有何好玩| ACTIVITIES

[体验月尘的“欢乐”]

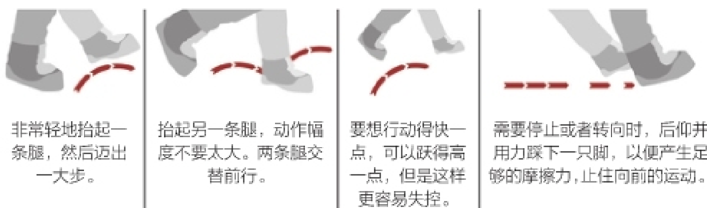
月尘也许听起来浪漫，但它就像一条流浪狗——你走到哪儿它就跟到哪儿，绝不肯放过你。这种被称为月土的微尘覆盖月球表面大部分区域，有些地方深达12米。探访月球期间，你会深入地了解月尘。它们无孔不入。当你一再扫地，努力保持清洁却徒劳无功时，记得淡定一点。别忘了：你是在月球上扫地哦。月尘被扬起来后会慢慢地落下，就像由灰尘团做成的雪花。

月尘非常有用。你可以利用太阳或者微波的能量加热它，制造月球混凝土，这个过程叫作“烧结”。烧结后的月尘可以被用来修建道路和建筑物。很快你就会注意到，色调考究的月球灰无处不在，就像是沥青的颜色。和地球上古老而普通的混凝土一样，它能非常有效地阻挡太阳辐射，而这正是月球生存所必需的。

地球上的月球舞步



真正的月球漫步



[漫步月球]

在月球上行走就像是在水下蹦床上行走。你至少需要10分钟才能掌握基本技巧，但是要想克服在地球上培养出来的直觉并掌握月球运动，你可能需要几年的时间。在地球上行走时，我们会把重心放在前腿上。如果你在月球上也是这样，你会发现自己走得很慢，效率很低，而且不稳定。因为你的肌肉力量在月球上更有效能，你不需要怎么弯腿就能走路。你很容易使过了劲，而低重力会使你向上飞去，无法停止或者控制自己的运动。

一种颇受欢迎的方式是两腿交替在前，步子大一些，就像在进行慢速的越野滑雪，这种方法被尼尔·阿姆斯特朗称为“大步慢跑”。另一种方

式是步子小一些，一条腿始终在前，另一条腿小步挪动。

[玩太空球]

在月球的低重力环境下锻炼是一项非常刺激的体验，但一旦你习惯了，它能有效防止你的骨骼和肌肉变得脆弱。预先警告：虽然你会觉得自己强大如超人一般，但是如果没有经过适当的练习，你的身体很有可能出现严重损伤。

太空球源自经典的棒球运动，是其令人愉悦的低重力版本。你玩的时候，会发现一些关键的差异：

·因为这种运动在真空中进行，曲球、滑球和蝴蝶球等依赖气压实现的球路是不可能出现的。

·被施以同样的力量时，一个普通棒球在月球上的飞行距离可达地球上的30倍以上。

·太空球场比普通棒球场大，而且比赛会很危险，因为球飞得很快（没有空气就意味着没有空气阻力）。这里不允许本垒打，界外球由大网回收。

·球员击球后很难跑起来，但是一旦跑起来，就会很难停下，因此高质量的防滑钉必不可少。

·太空球服需要比普通宇航服更坚韧，才能承受意外的撞击。

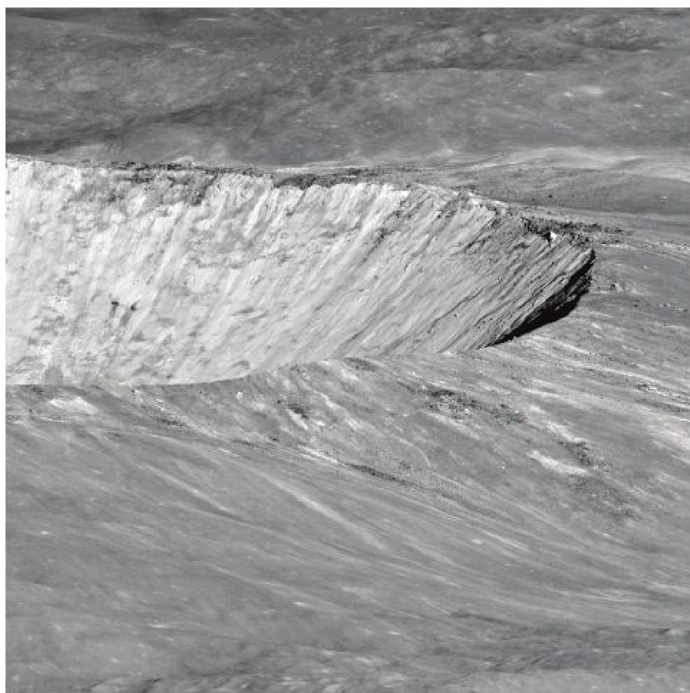
[探索熔岩管]

洞穴爱好者会热衷于探索月球的地下熔岩管，那里是流动熔岩形成的古老隧道。它们可以阻挡太阳的辐射，因此成了住宅和建筑的理想天然脚手架。虽然你不必担心遇到热熔岩，但熔岩管其实并不好对付，里面的地形高低起伏。你需要一个装着长腿而不是轮子的漫游车才能在石质地面上行驶。如果你决定探索某个未知的管道，在冒险进入之前一定要开展一次地质调查，确保它是稳定的。在极少数情况下，熔岩管内部可能还封存着早期的月球大气，气体有可能爆发式地释放，将你掀翻在地。月球上已知最大的洞穴位于澄海。

[在月球背面观星]

在月球上长达两周的黑夜里，你将拥有一览无余的观星体验。月球（以及我们太阳系中的其他所有地方）足够接近地球，你仍然可以辨认出星座。从地球上看去，群星是闪烁的，这是因为星光穿过大气层时会受到轻微的偏折，而月球上没有大气，你在那里看到的星星不会闪烁。南半球的观察者可以看到星星绕着月球的南极星——金鱼四——旋转。

一定要选择带有防反射涂层的头盔面板，它将有助于减少月面、车辆或者你的宇航服造成的漫反射。



乔尔丹诺 · 布鲁诺撞击坑是月球上适合游历的众多撞击坑之一。

——

美国国家航空航天局 / 戈达德太空飞行中心 / 亚利桑那州立大学

月球背面是开展射电天文学观测的理想场所，这一学科会利用波长非常长的电磁波帮助天文学家揭示天体的本来面目。木星的光环不如土星的壮观，但它在无线电波段中却比在可见光波段中更为明显。射电望远镜也对来自遥远星系的光很敏感，在到达你这里之前，那些光已经遨游了数十亿年。射电波与微波炉和收音机所用的波是一回事，不过它们来自遥远宇宙中的恒星和气体，不是你家中的小盒子。月球表面的小撞击坑为大批用来探测射电波的碟形设备提供了完美的家园。月球背面不会受到地球大气层以及数十亿居民电子噪声的干扰，这一点很重要，因为仅仅是附近的一部手机就可以淹没来自亿万星河的微弱信号。当你参观月球背面时，可以在乔尔丹诺·布鲁诺撞击坑停留一下，这个宽22千米的撞击坑山壁陡峭，你也许想试试踩着滑板下山。

[参观月球矿山]

水对于维持月球上的生命以及制造火箭推进剂都是至关重要的。戴上安全帽，探索一下月球上的地下工业。月球岩石中富含斜长石和斜长岩，这些矿物可以被提取出来炼铝。钛铁矿可用于提取钛和铁，其中的

硅和氧可以制取出来用于材料工程、制造空气及火箭推进剂。最有价值的自然资源之一是氦-3，它是聚变反应的关键原料，在地球上极为罕见，但在月球上非常丰富。月球背面以氦-3的大储量而闻名，来自太阳风的粒子流将这些高浓度的氦-3埋藏在了这里的月尘中。

[附近有什么]

观赏过月球的风景后，你可以返回地球或者继续前往其他行星。在月球轨道之外有一个很好的小避难所叫作地月L2，这是另一个拉格朗日点。你也许以为一颗离地球比离月球更远的卫星运行得更慢，但其实在L2，月球提供了额外的引力，能让卫星沿着月球绕地轨道运行。在这里，你远离地球引力的牵引，可以开始为你下一阶段的旅程做准备了。

目的地：水星

DESTINATION-MERCURY

如果你在寻求一个阳光普照的假期，没有什么目的地比水星更合适的了。只要参观过一次这颗没有卫星的闷热行星——这颗离太阳最近的大石头，你就会在未来的岁月里对它念念不忘。对于普通的度假者来说，这颗行星看起来很像月球——到处都是撞击坑，几乎没有空气，仅比月球宽800千米，重力是其两倍。但是如果你到水星游历一番，就会发现这里的情况是不同的。水星表面不断经受着剧烈温度波动带来的炙烤与冷却，骄阳酷热如火，但太阳落山后，寒冷就开始了。

水星强烈吸引着那些无畏的太阳崇拜者，那些人不惧怕随之而来的因暴露而死亡的风险。无论你是敢于和表面危险的日间气候戏耍，还是喜欢缩进看不到太阳的地下栖息地里享受宁静凉爽，你的水星之旅都将充满令人愉悦的矛盾。这颗最热的行星上有很多阴凉处，两极甚至还有水冰。在附近的太阳提供的无限太阳能的帮助下，你有一半的机会能在水星假期后活着回来。不过，只有最勇敢、最坚定的冒险家才会决定赌一把。如果你是那种喜欢炫耀的人，水星之旅绝对值得你好好吹嘘一番。记住，别管你在那里做了些什么，在水星度假中活下来的成就本身就很能说明问题。

速览

AT A GLANCE

直径：地球的33%

质量：地球的6%

颜色：灰色，并有对比鲜明的阴影

绕太阳运行速度：大约每小时17.24万千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的23千克重力

空气成分：几乎谈不上什么空气，只有极少量的氢气、氦气和氧气

构成：岩石

光环：无

卫星：无

温度（最高、最低、平均）：427摄氏度、零下179摄氏度、167摄氏度

一日长度：4222小时36分钟

一年长度：88个地球日

与太阳的平均距离：0.58亿千米

与地球的距离：7725万～2.22亿千米

旅行时间：147日可飞越

向地球发送信号的时间：4～12分钟

季节：无

天气：无

日照：相当于地球上的5～10倍

独特景观：双日落、幽灵撞击坑、波纹状山脊、空洞、火山、冰

适宜：太阳崇拜者，地下生活

天气和气候| **WEATHER AND CLIMATE**

水星是冰与火之地。正午时分，照在它崎岖表面上的阳光强度差不多是地球上最炎热的沙漠中最炎热的日子里的阳光强度的7倍。然而日落之后，这里的温度会变得比海王星上还低，而且水星上有些地方在几十亿年中都没有享受过阳光。这些阴暗的地方位于水星遥远极地的深坑底部，保护着冰冻的水不受酷热阳光的照射。

如果你应付得了表面上的热量，你会体验到昼夜之间的极大温差。在黎明时，水星的温度是凉爽的零下179摄氏度。随着太阳升高，地面开始变暖，最终达到427摄氏度。因为没有大气传递热量，阳光会直接烘烤着你，如果你在中午时出去，炽热的地面也会向上散发热量。晚上，当你能够探访水星表面时，你需要一件能够加热且隔热的宇航服，防止你把宝贵的热量都辐射出去。一定要穿隔热靴，否则你的脚会被冻成冰疙瘩。

水星上一天很长，一年却很短。比起地球，它的绕日速度更快，而且轨道也更短，因此一年只有88个地球日。太阳在它近侧和远侧之间不均衡的拉力减缓了它的自转，因此，水星自转一圈需要59个地球日。但是水星的太阳日——太阳两次出现在天空中同一位置的时间间隔——等于176个地球日，相当于自转三周或是两个水星年。这意味着水星上的太阳日比水星年长。

我们所知的春夏秋冬在这颗异星上是闻所未闻的。地球自转轴的倾斜促成了季节的形成，但是水星的自转轴并不倾斜，因此它的极点从不会靠近或者远离太阳。地球上富有特色的四季更迭被极热和极冷的二元环境取代。

你在外面游逛时不必担心暴风雨。这颗行星上没有真正的风。唯一的微风是来自太阳的高能粒子持续不断的流动，即太阳风。

何日启程| **WHEN TO GO**

隆冬时节，当你受够了身上裹了一层又一层的毯子，也受够了铲不尽的积雪时，考虑一下水星上那些骄阳炙烤下积满尘土的撞击坑吧。如果你的生活需要一点阳光，水星可以满足你。在那里，仅需24个小时，你受到的日晒就相当于地球上整整一周内的日晒。

然而，日照过度这样的事情也是有的，在水星上就很容易发生。太阳有它自己的风暴模式，每隔11年，它就会变得活跃并发射高能耀斑。在地球上，这种太阳天气与我们的磁场相互作用，会导致电子设备的损坏。在水星上，一场太阳风暴也会突然结束你的假期，因此去之前记得查看一下太空天气报告。

水星有一条椭圆形轨道，它的炎热季节出现在它离太阳最近的时候。如果你足够明智，一定要记得避开这个时段。如果你在水星离太阳最远的时候游览，白天的最高温度便不会是427摄氏度的极值，而是只有277摄氏度。你也会离任何突如其来的太阳风暴更远一些。

水星上的一年很短，因此没有必要把你的旅行时间确定为一年中的某个特定时间点。在短短6个地球月的时间里，你就可以在水星上体验到强烈的冷热环境对比，这一点非常适合那些冷热通吃的人。

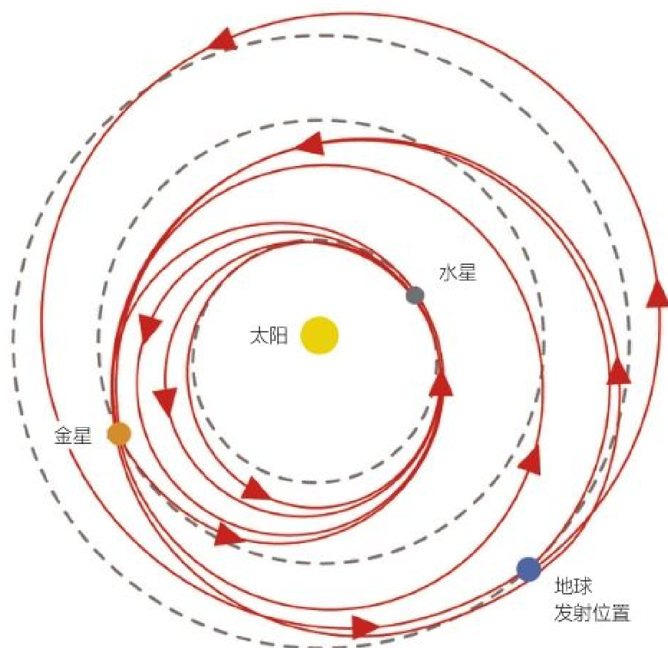
漫漫长路| GETTING THERE

水星的运行速度很快，因此到达那里远比你想象中棘手。船票可能很贵，但太阳系中没有比那里更加阳光灿烂的地方了。它距离地球至少有7700多万千米，而且因为它的绕日速度（约每小时17万千米）比地球的绕日速度快大约6.4万千米/时，因此追赶上水星且不被意外拉进太阳所需的燃料，要比飞出太阳系所需的燃料更多。一些更省燃料的飞行路线可能需要长达11年之久，在此期间，你的飞船要数次借力于金星和地球的引力，并最终进入绕水星运行的轨道。不过，如果你愿意呼啸而过不停留，也可以在147天内就到达那里。

水星上有丰富的太阳能，这一点很招那些具有生态意识的度假者喜欢，因为太阳能是一种可再生能源——至少在未来几十亿年内，太阳消亡之前都是如此。在靠近太阳的过程中，你需要时刻注意自己的太阳能板所产生的电力，以防电子器件被烧熟。如果你得到的能量太多，可以偏转它们的方向，让它们不再对着太阳。

灿烂的阳光虽然美妙，太阳引力却会让导航员烦恼，因为飞船总是容易偏向太阳，就像一辆需要时刻进行车轮校正的汽车。

尽管水星跟其他很多行星相比离地球更近，但它的运行速度很快，而且离太阳很近，想要抵达并不容易。



到达之后| WHEN YOU ARRIVE

当你的飞船接近水星时，你可能会疑心自己拜访的其实是月球。然而等到着陆后，你会发现水星岩石在色调和质地上并不同于月球。你会注意到对比度——眼睛适应了天空的黑暗后，你会发现明亮的东西看起来更亮，阴暗的东西看起来更暗。

水星表面含有石墨，因此看起来比月球黑，呈现出铅笔芯般的色调。虽然拥有一个巨大的铁质核心，它的表面上却很少有铁。水星表面的颜色主要是石墨灰，略带红棕色，有些区域略微泛蓝。熔岩通道看上去像是干涸河流和自身地貌不断改变的神秘空洞，这些都暗示着这是一颗变化中的行星，仍然有着活跃的地质活动。

水星地貌的多样性会给你留下深刻的印象。它见识过猛烈的撞击、火山爆发和造成其表面褶皱的核心收缩，它拥有巨大的悬崖、双环陨石坑、沟渠、神秘的极热点和极寒点。

虽然来自太空的撞击决定了水星表面的大部分形态，但这颗行星也以其拥有的强大构造力塑造着自己的面目，或是裂开形成山谷，或是通过挤压形成被称为叶状陡崖或褶皱脊的漫长蜿蜒山崖，这些陡崖、峭壁

能够在水星表面延伸数百千米。

你需要在晚上降落，然后在太阳升起之前，从铺满尘土的表面降到某个地下城市。即使是在地下，如果没有高反射屋顶，白天的温度也会高得不适于生存。而这些高反射屋顶，可以在大约10年的时间里一直反射足量的阳光，使得地表之下冷却到可生存的温度。

如果渴望看到白天的天空，你可以安全地待在地下深处，通过太阳观测镜观察。你会看到一片星星点点的漆黑背景。虽然严格来说，水星上有一些几不可察的大气，但是这点大气不足以构成天空，也不足以让星星闪烁。继续寻找，你会看到异常灿烂的太阳，与星星共享黑暗的天空。

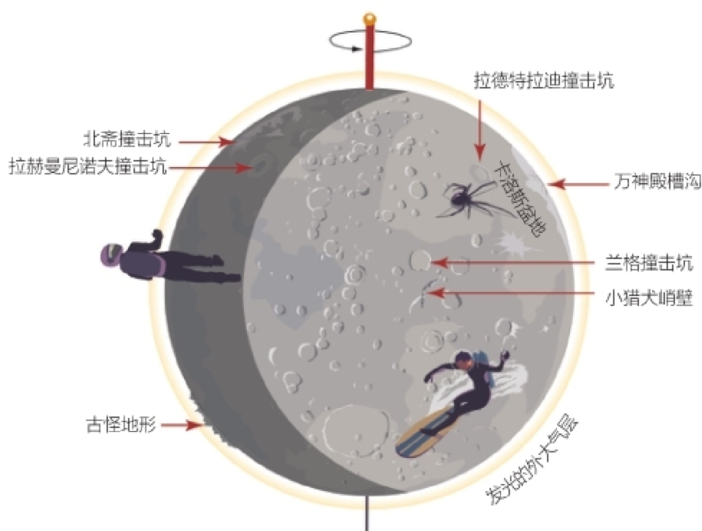
何以代步| GETTING AROUND

水星不是太阳系中最热的行星（这个荣耀要归属于金星），但是也已经热到让生活中的某些方面成了麻烦事。你需要仔细规划地表行程，因为每时每刻，这颗行星上都有一半区域遭受着不经大气遮挡的太阳辐射的粗放攻击，也正因如此，水星并不适于生存。

有些人喜欢待在两极某些撞击坑相对稳定而又寒冷舒适的永久黑暗中。那些在极地以外冒险的人必须适应一次性在地下待好几个地球月的生活，因为严酷的高温会让人无法在地面上活动。日出带给地下居民的是一种恐惧感，他们明白，如果在错误的时间留在了外面，就会被烤死。

你可以租用漫游车或者跳跃机进行区域夜间旅行。对于更长的距离，你可以预订一个行星际火箭的座位。一次发射延迟可能会导致意外的长时间停留，因为你需要等待地面旅行恢复。要有耐心。在你迫不得已的地下归隐期间，你可以研究一些著名艺术家的作品，这颗行星上的很多地标都是以他们的名字命名的。你可以花两个月的时间钻研契诃夫的信件，看默片明星碧莉·伯克（Billie Burke）的全套电影，或者研究日本茶道大师千利休的技艺。

在危险阳光照不到的安全阴影里，你能了解到水星的很多秘密。



有何好看| WHAT TO SEE

[北极]

从轨道上接近水星北极时，你会看到令人叹为观止的100千米宽的北斋撞击坑。这个撞击坑是以18世纪日本艺术家葛饰北斋的名字命名的，木版画《神奈川冲浪里》是这位艺术家得以扬名世界的代表作。因小行星猛烈撞击而迸发出去的岩石形成长辐射状的纹路，从撞击坑中心向外延伸数千千米。它覆盖了水星北半球的一大半，是太阳系中最大的几条辐射纹。

水星北极全年保持着凉爽的零下93摄氏度，这与地球上记录到的最冷温度很接近。水星的两极都有水冰存在，它们形成于从来照不到阳光的阴暗撞击坑里。北极的冰层厚达一二十米，比地球上的南极冰盖小1万倍，不过，有总比没有好！

一直藏在阴影中的撞击坑拥有稳定的寒冷环境，科学家们期盼着能够挖掘已有亿万年历史的冰芯，以此研究太阳系的撞击史。他们想要验证是不是一颗充满冰的彗星造就了北斋撞击坑，并在撞击过程中将被震碎的冰留在了极地。

攀冰爱好者可以在这个地区的撞击坑边缘尝试攀爬。虽然也有一些

斜度适合的坡，但低温对滑雪运动构成了威胁，这里的冰被冻得像岩石一样坚硬。

以20世纪早期俄罗斯作曲家、《彼得与狼》的曲作者谢尔盖·普罗科菲耶夫名字命名的普罗科菲耶夫撞击坑，是北极地区最大的撞击坑。这个洼地里有大量的冰，在科学家看来，这些冰是在撞击坑形成很久之后才落到地面上的。

如果你还有几周的时间，你可以去北极点附近的撞击坑群南边探索一下北极广袤的火山平原。站在成百上千千米宽的熔岩场中央，你会感觉到前所未有的渺小。几十亿年前，不可思议的猛烈喷发让炽热的液体覆盖了这一地区，并最终形成了今天的地貌。



明亮的辐射状线条会引领着你来到水星上震撼人心的北斋撞击坑（位于图片边缘位置）。

美国国家航空航天局／约翰·霍普金斯大学应用实验室／华盛顿卡内基研究所

[卡洛斯盆地]

等你在北极凉快够了，就可以到卡洛斯盆地[6]让身体暖一暖了。行程很短，在途中你可以从空中欣赏到5条以古代废城命名的宽广山谷：卡霍基亚、卡拉尔、帕埃斯图姆、提姆加德和吴哥。继续向南时，仔细观察东方，你可能会瞥见奥斯肯森火山口。它得名于美国印第安作家约翰·弥尔顿·奥斯肯森（John Milton Oskison），或许很多作家都希望在这座120千米宽的撞击坑中央的群峰间过上宁静的日子。

你可以在阿杰特撞击坑中心的南面降落。这个地表颜色深重、宽达100千米的大坑得名于法国摄影师尤金·阿杰特（Eugène Atget），阿杰特以其对19世纪晚期及20世纪早期巴黎的广泛记录而闻名。从阿杰特撞

击坑出发，你可以探索卡洛斯盆地巨大而平滑的熔岩平原。这是太阳系中最大的撞击坑之一，宽度超过1500千米，面积和美国阿拉斯加州差不多大，一圈超过3000米高的山脉环绕在其周围。在主要的山环之外，还有绵延数千米的崎岖不平的丘陵平原和因巨大冲击而被抛出的陆地排成的线条。专家认为，在数十亿年前凿出这个盆地的巨大太空岩石的直径至少有100千米。猛烈的撞击造成了水星另一面的隆起，这一对跖点被称为“古怪地形”。形成平原的熔岩流覆盖了一个巨大的区域，而且和地球上火山的喷发物相比，它们的黏性也要小得多。

在卡洛斯盆地中有很多值得探索的地方，包括以美国哥特风作家埃德加·爱伦·坡（Edgar Allan Poe）和以名作《呐喊》（The Scream）著称的挪威画家爱德华·蒙克（Edvard Munch）的名字命名的撞击坑。不过最吸引人的是万神殿槽沟，因为样子像个吓人的爬虫，这一系列沟堑得到了“蜘蛛”的诨名。该构造的中央是一个40千米宽的撞击坑，周围有一百多条被称为地堑的狭窄峡谷向外延伸。每一条地堑宽不过十几千米，有一些会延伸超过300千米。没有人确切地知道这些峡谷是如何形成的，以及以万神殿的建筑师阿波罗多罗斯（Apollodorus）的名字命名的中央撞击坑是否与此有关。沿着峡谷徒步旅行时，你可以寻找一下能够揭示该地区神秘过往的线索。这个构造看起来与水星上的其他任何东西都不一样，而且和人们对行星地质学的传统理解不符。

你可以花一天、一周或一个月的时间探索那些槽沟。对于倾向于走简单路线的人来说，你可以在阿杰特撞击坑和中央的阿波罗多罗斯撞击坑之间乘坐穿梭机。不过要记住，太阳出来的时候，所有的穿梭机服务和地表活动都会停止，你可不要在晨曦将至时被困在一条峡谷里。

当太阳终于再次落山后，你可以继续探索卡洛斯，参观以美国摄影师伊莫金·坎宁安（Imogen Cunningham）的名字命名的坎宁安撞击坑。水星的高对比度光照提供了一个理想的背景，供你完善黑白摄影技巧。在卡洛斯盆地西侧，你可以在凯鲁亚克撞击坑中停留一夜。这个110千米宽的洼地是这颗星球上另类人群的王国，你可以去撞击坑的中心朝圣，当以地球为中心的宇宙观崩落时，新的诗意会奔涌而出。

[拉德特拉迪盆地的空洞]

在凯鲁亚克撞击坑以西240千米的地方有个拉德特拉迪盆地。你将站在这个260千米宽的年轻撞击坑（只有10亿岁）中心，注意到远处的两条山脊。一条在63千米以外，另一条在130千米以外。它们是这个撞击坑的“双环”。这个盆地也有类似于万神殿槽沟的地堑，它们可能是在“延伸”过程中，或者在水星表面的大规模伸展和收缩过程中形成的。这些浅浅的山谷不是向外辐射，而是排列成同心圆，仿佛是从盆地中心旁10千米处的一个点激起的涟漪。

这个因博茨瓦纳剧作家、诗人里提尔·迪桑·拉德特拉迪（Leetile Disang Raditladi）得名的撞击坑最引人入胜的谜团是它的硫黄空洞。空

洞中的图案是最近形成的，这表明水星仍在变化，仍存在着类似温泉的活跃地质活动。与水星其余部分灰蒙蒙的锈色相比，它们能够反光，看起来色泽饱满。人们在水星表面的其他区域也发现了这种模样有趣的凹陷，它们可能是因为地面中的物质被热量蒸发而形成的。一些物质在夜晚相当稳定，但是人们认为它们到了白天就会直接变成气体，这个过程叫作升华。

空洞很容易攀登，深度从9米到10层楼的高度不等。它们的长度可达1000多米。站在里面时，你会觉得自己身处一个小峡谷中，只不过洞壁更亮。在空洞中穿行时要小心，岩石上满是洞，而且在它逐渐变宽时，可能会发生意外崩塌。有经验的游客可能会注意到，相比其他那些亿万年碰撞造就的古老地区，踏上这片年轻的土地能感受到不同的质地或嘎吱声。其他可以观察空洞的好地方包括凯尔泰斯撞击坑和世阿弥撞击坑。

[小猎犬峭壁]

在拉德特拉迪盆地的南面，你可以沿着小猎犬峭壁行进。这是一条约600千米长、1.5千米高的悬崖，横穿好几个撞击坑。在水星的早期历史中，当整颗行星随着其熔融铁核的冷却而收缩时，大地上形成了数十道裂缝。这些悬崖以著名探险家的船只名字命名。小猎犬峭壁的名字来自“小猎犬”号，查尔斯·达尔文（Charles Darwin）正是乘着这艘船前往南美洲和澳大利亚进行大范围科学观测的。位于峭壁西北部的是兰格撞击坑，它得名于早期美国摄影师，以1936年的摄影作品《移民母亲》（Migrant Mother）而闻名于世的多萝西娅·兰格（Dorothea Lange）。

[拉赫曼尼诺夫盆地]

直径290千米的双环形撞击坑拉赫曼尼诺夫是水星上最年轻的撞击坑之一。130千米宽的内环里面是平滑的红色平原，人们普遍认为这是火山熔岩流的遗迹。环的南部似乎也被熔岩流淹没过。幸运的话，你能在群星之下赶上一场宁静的拉赫曼尼诺夫夜间音乐会。管弦乐队可以演奏，但是因为没有空气作为介质，乐器并不会发出声音——你可以把这看作是水星对约翰·凯奇（John Cage）的致敬。[7]

有何好玩| **ACTIVITIES**

[两个生日]

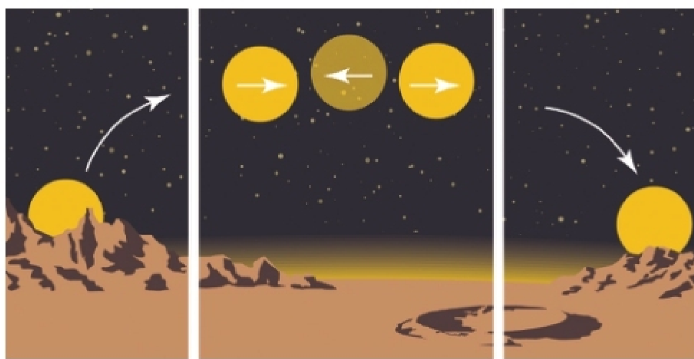
在最好的假期中，时间似乎会停止，你希望完美的一天能够持续到永远。在水星上度假可能会让你的这个梦想最接近于现实。在水星长达4224个小时（176个地球日）的太阳日中，你可以安排很多活动。这也意味着你可以一天过两次生日，而且能够轻而易举地活到300岁——只

要你是在用水星年计算。

[观看两次日落]

拜访水星的一个最大原因是可以见证太阳在黑暗天空中的奇特行为。当然了，除非你有一个死亡心愿，否则你不会亲眼看到太阳在天空中舞蹈。你将利用地下望远镜安然无虞地观看，并且为太阳的杂技喝彩。从这个独特的有利位置上，你可以看到太阳不紧不慢地从头顶经过。每天都有一个特殊的时刻，它好像会暂时停住脚步并逆向而行，然后再继续长达几个地球月的日落之旅。如果你位于水星上的某些特定位置，当它经过近日点，角速度暂时比自转速度快时，太阳甚至可能会落下去再升上来。利用这一时刻反思过往，想想如果你能让时光倒流，你会做些什么，放下旧日冤仇，纠正你在上一个水星早晨（上一年）里犯下的错误。

当太阳在天空中向后移动时，你可能会注意到它硕大无朋的样子。放心，这不是日晒过度影响了你的判断。因为水星接近太阳时，太阳看起来确实比在地球上大。水星的扁长椭圆形轨道增强了这种效应，太阳仿佛会在一年的周期内膨胀、收缩。在水星距离太阳只有4600万千米的近日点时，太阳看起来是地球上的3倍大，而当水星位于离太阳6981万千米的远日点时，太阳看起来只有地球上的两倍大。



太阳系中最迷人的自然现象之一是太阳在水星天空中的逆行。这种怪异的现象是迅疾的公转速度和迟缓的自转速度共同造成的。

[驾驭太阳风]

将你的太阳帆船上的反射帆扬起来。太阳发射出来的光子会从镜子一般明亮的表面上反弹，给你的飞船一个微小的推力。这种名为“辐射压”的复合效应能够让你在太阳系中遨游。你可能不会急剧加速，但是随着时间的推移，你将慢慢地获得速度，渐渐快到足以飞过一个天文单位[8]。不过，如果遭遇了太阳耀斑，你就必须关紧舱口。

[追逐不落的夕阳]

参观水星的主要原因是有机会跟着它缓慢移动的晨昏线行走。因为这颗行星旋转得很慢，人们有可能始终走在日出的前面。水星上的晨昏线以每小时3.54千米的合理步速移动，而地球上晨昏线的行进速度约为每小时1600千米。晨昏线上有着浓重的阴影，这一昼夜之间的安全地带令人惊讶地保持着宜居气候，不过万一被它落下，后果就是致命的。不要直接被阳光照到，否则你将变成又一堆点缀着水星风景的人体焦炭。不过，极限运动员一定会愿意接受一次性绕整颗行星行走1.5万千米的挑战。

[火山沙滑沙]

几十亿年前火山喷发留下的细沙非常适于玩沙板和滑沙。低重力为做出这些酷炫动作提供了完美的条件。整颗星球上有几十处这种所谓的火山碎屑堆积，其中一个位于卡洛斯盆地西南部，另一个位于柯普兰撞击坑西部。



水星上的晨昏线并不是来自未来的机器人[9]，它缓缓移动在亮面和暗面之间。

美国国家航空航天局 / 约翰·霍普金斯大学应用实验室 / 华盛顿卡内基研究所

[领略散逸层的超自然光芒]

水星上的大气非常稀薄，散逸层中富含钠元素。夜幕降临时，琥珀色的光辉笼罩着天空，仿佛停车场里的钠蒸气灯。它会让你想起地球上的极光，但它弥漫在整个天空中，接近地平线处最亮。这种光足以令人视物。不过幸亏如此，因为你所有的表面活动都必须在夜晚进行。

[参观幽灵飞船]

当人类首个探访水星的航天器水手10号在20世纪70年代耗尽燃料，开始在太空中漫无目的地漂流时，科学家就与它失去了联系。从那时起，没有人收到过它的丝毫信息。水手10号的“幽灵”依旧在太阳系中出没，传说它的灵魂一直在召唤水星，跟随着它，仍在试图研究它，可能还收集着数据，并古怪地把数据送入空虚的外太空。你还可以看到另一艘遇难飞船信使号的残骸，它事先就被规划好，于2015年4月30日坠入这颗星球，其撞击在水星表面留下了一个约16米宽的坑。

目的地：金星

DESTINATION-VENUS

人们说金星是适合情侣的度假地点。只要你坚持待在灼热表面上方的温和气候中，金星便配得上它的英文名维纳斯——罗马神话中代表爱、美与欲望的女神，为你提供放松的氛围，让你乐享没有工作压力的时光。许多度假者是在地球的夜空中感知到一枚亮星的召唤，然后决定去拜访的。这是一个非常适合反思浪漫主义的地方。

金星是我们最近的邻居，经常被称为地球的火热孪生兄弟。它的尺寸与地球大致相同，重力也差不多，平均气温却比地球高出400摄氏度。金星是太阳系中最热的行星，甚至比水星还要热，因此许多天真的游客认为金星上的天气无法忍受，也就不足为奇了。大多数人没有意识到的是，金星的天空是太阳系中最友好的环境之一，而且对于那些采取了适当预防措施的人来说，金星表面上也有足够的消遣活动。

金星上的悬浮城市亲吻着壮美的云霞，飘浮在它的硫酸雾中，你会感觉自己身在天堂。只不过要确保你的空气罐是满的，而且穿了耐酸服。如果你不容易晕机，喜欢欣赏云层且不受高压环境的困扰，你就可以准备与金星相见了。

速览

AT A GLANCE

直径：略小于地球

质量：地球的81%

颜色：金色与红褐色相间，沐浴在黄色的光线中，点缀着白色的云朵

绕太阳运行速度：大约每小时12.6万千米

引力：一位60千克的人所受的重力相当于地球上的54.4千克重力

空气成分：空气浓度高，包括96.5%的二氧化碳、3.5%的氮气，及少量的二氧化硫、氩气、水蒸气和一氧化碳

构成：岩石

光环：无

卫星：无

温度（最高、最低、平均）：485摄氏度、465摄氏度、475摄氏度

一日长度：2802小时

一年长度：大约7.5个地球月

与太阳的平均距离：1.08亿千米

与地球的距离：3862万～2.6亿千米

旅行时间：100日可飞越

向地球发送信号的时间：2～15分钟

季节：几不可辨

天气：风缓慢而强劲；偶有火山爆发引起的硫酸雨

日照：在云顶相当于地球上的两倍

独特景观：浮城

适宜：热度追求者，心在云端的人

天气和气候| WEATHER AND CLIMATE

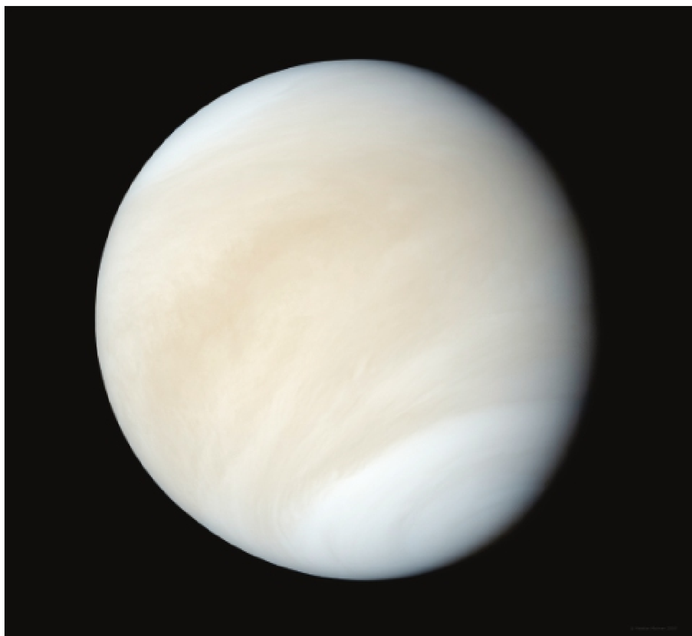
太阳系中最接近地球气候的地方位于金星表面上方55千米处。就像《格列佛游记》中著名的浮城拉普达，这个距离足以让人忘记下面的酷烈环境。这里的天气温和而且完全可控，大概在30摄氏度，压力与地球表面相仿。

不过金星表面就是另外一回事了。除非你喜欢过分的炎热，否则金星闷热的大地就是一个噩梦般的地狱。太阳系中最热的行星就是这样的感觉。空气中96%的成分是导致地球变暖的温室气体二氧化碳，浓重的烟雾吸住了太多的热量，让温度升到了令万物焦枯的465摄氏度。如果大气中有氧气，一张飘散的纸就会自发地燃烧起来。虽然相比于地球，金星离太阳更近，但是如果没有温室效应来保持热量，其表面温度应该是寒冷的零下13摄氏度。

金星坚实的大地犹如地狱，这固然不假，但它是在可预测范围内的。有浓密的大气层做缓冲，这里的温度从早到晚，或者在整个金星年中，都不会有太大的起伏。季节可以说是不存在的，因为自转轴倾角不大，太阳的光照大体均匀。金星上的一年仅持续7.5个地球月，它自转一周的时间是太阳系中最长的243个地球日，这比当地的一年，也就是225个地球日还要长，也比相当于地球上117天的一个太阳日，即两次日上中天间隔的时间要长。

神奇的是，金星的自转方向只和天王星的自转方向相同，和其他行星的相反。如果你能在表面上透过云层看到太阳，并且在一整个金星日里持续观察（祝你保持清醒），你就会看到太阳是西升东落的。这种奇怪行为的原因是一个谜，不过有可能是很久以前一颗巨大的小行星碰撞的结果。

金星上的古代海洋早已蒸发得一干二净，没有留下丝毫痕迹。如果你突然在金星表面上倒一大堆水，它在蒸发之前会像汽水一样冒泡。金星上的高压及富含二氧化碳的大气起到了巨型气泡水机的作用。



金星云层的真实色彩图像。本图中蕴含的细节要比肉眼能够看到的多一些。

马提亚斯·马尔默（Mattias Malmer）/美国国家航空航天局

迟缓的风一刻不停地在金星表面上滚动着。这股风的力量可能出乎意料地强大，因为浓稠的空气很容易吹翻重量较轻的物体。除却这种惯常的恒定，天气偶尔也会变坏，火山爆发会引发大面积的酸雨，雨点在落到表面之前便会化作蒸气。金星上也有闪电，它激荡在硫酸云团之间，和地球上的闪电差不多。如果你能够看穿阴霾，可以在橙黄色的天空中寻找到怪异的闪光。

何日启程| WHEN TO GO

只要你只乘坐飞艇待在它温和的高空中，任何时候都是游览金星的好时机。对于渴望进行自我审视的人来说，那里是可靠的避难所。旅程挺长，但也不算太长。你会离开几年——时间长到足以彻底改变你的观点。刚毕业的大学生可以去那里度过空档期，思考自身的存在。生活中若是发生了重大的转变，那里也是个逃离、复原，然后重整旗鼓的理想去处。

漫漫长路| GETTING THERE

记住，你未来的度假地点是一个移动的目标。金星以每小时12.6万千米的速度绕着太阳飞行，几乎每小时比地球快1.9万千米。它离地球最近的时候是在3815万千米之外，你需要加大油门才能赶上它。使用蛮

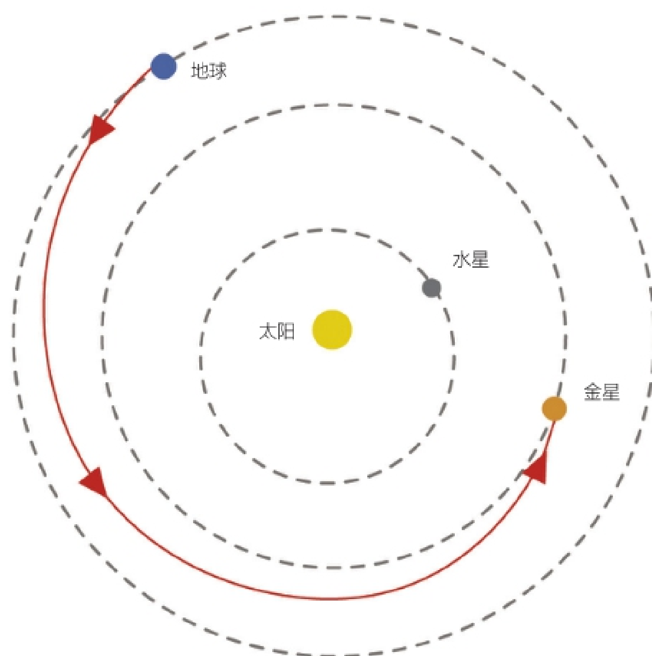
力，也就是靠火箭推力来弥补速度差距，除了需要消耗大量的燃料，还有可能对你的轨道产生意想不到的影响。记住：燃料就是重量，重量就是金钱。

在两颗行星之间旅行的其中一条路径叫作霍曼转移轨道，这是一条连接两个轨道物体的低能耗路径。这个名字来自20世纪初发现了它的德国科学家沃尔特·霍曼（Walter Hohmann）。如果你选择了这个飞行计划，你将在一条与两颗行星的路径都有交叉的椭圆形轨道上移动，在大约5个月后到达。因为地球和金星都在运动，每19个月，你只有一次机会——一个发射窗口[10]——能够沿着霍曼转移轨道飞行。尽量不要把你的航班安排得太靠近发射窗口的末尾，因为如果你的发射被取消了，你必须等一年半才能再试一次。

你可能会认为，从地球出发，需要让你的飞船加速才能赶上金星。然而，火箭科学并不是那么简单。为了匹配金星的轨道路径和速度，你需要背对着地球绕太阳运动的方向启动推进器。这将使你的轨道更靠近太阳，你自然也会飞得更快。

到达金星时，一个好消息是它有着浓密的大气，可以作为廉价的制动系统。你可以在大气层顶部滑行减速，不过要多加小心，金星的空气太过稠密，一不小心就会着起火来。

作为地球的近邻，金星是最热门的行星度假地之一。



长时间待在漆黑的太空里，明亮的金星会让你感到头晕目眩。不过，明亮的不是表面，而是缥缈的金星云顶。在厚厚的云层中，熠熠生辉的空中城市若隐若现。这些安全、豪华的避风港将是你旅行的第一站。

天空看起来熟悉而诱人，但是金星富含二氧化碳的空气很快就会让你窒息。有利的一面是地球上的空气很容易在金星的浓密气海中飘浮，充满可呼吸空气的栖息地悬在空中，就像地球上的氦气球一样。这种名为“张拉整体城市”的空中网格式城市可以和地球上的城市一样大，它是由20世纪天才发明家巴克敏斯特·富勒（Buckminster Fuller）首先提出的。它隔绝了周围的空气，内部则充满了类似地球上空的气体，可以使它飘浮在金星的天空中。向窗外看去，你会看到自己身处一层厚厚的蓬松白云中。不要被它们令人愉快的外表欺骗了，许多云团都含有腐蚀性的硫酸。

虽然表面上一天长达2802个小时，天空中飘浮的城市却是与云层一起移动的，而云层仅需100个小时便可以绕整个星球一周。这意味着你必须适应50个小时的白天和50个小时的夜晚。当地习俗是以25个小时为周期，中间睡一次觉。这样一来，两个睡眠周期在白天，两个睡眠周期在黑夜。一间有着大观云窗和优质遮阳帘的宾馆房间可以帮助你在有太阳的时候入睡。

由于风的影响，你可能会有一阵子站立不稳。你需要计划好你的假期，留足时间适应天空。有些游客会立即适应，有些则会持续恶心一周左右。除了轻微的摇晃，湍流对天空居民来说是一个永久的威胁。就像地球上的风暴警报一样，湍流警报会让你知道是时候找到附近的某个安全庇护所，在里面躲过令人头晕目眩的天气了。

如果你决定探访金星表面，你会发现那里的环境迥然不同。在地面上，金星既是烤箱又是压力锅。其表面上的压力是地球海平面气压的90倍，相当于你在洋面以下900多米处承受的压力。

不过，你所看到的景象也许值得你克服这些困难。在云海下方深处，金星上弥漫着可爱的橙色光芒。在空气中传播时，蓝光比红光更容易散射，这就是地球上的天空呈现蓝色的原因。而在金星浓密的大气中，散射的蓝光被强有力地吸收了，只留下了橙色的光，让金星的天空永远沐浴在杏黄色中。这番景象会让你想起地球上的日落——只不过因为云层太厚，你根本看不到太阳。

有些人认为低光照条件增强了诡异的氛围。在这个昏暗的场景中，你可能会看到光线扭曲后的景象。就像沙漠里的海市蜃楼一样，来自天空或者远处物体的光线可能会发生扭曲。这让导航成了一件麻烦事，因为你不能指望用自己的眼睛获得周围环境的准确信息。不要试图去观察

物体有多远，而是要用地图或者卫星导航来为自己定位。除了扭曲的景观，金星上还有奇怪的声音。在浓密潮湿的大气中，所有的声音听起来都比平常深邃得多，它们低沉浑厚，扭曲成一种怪异的轰鸣。

何以代步| GETTING AROUND

游历金星云层有好几种方式。空气很厚，很适合滑翔。轻型金星飞机与地球上的飞机有着惊人的相似之处，它们利用金星离太阳较近的优势，仅利用太阳能就可以运行。只要你保持在日照强度相当于地球上两倍的云顶上方，就会有足够的动力驱动轻型飞行器。确保不要一不小心钻进云里或者往黑暗面飞得太远，否则你会失去动力，一头栽向皮焦肉绽的死亡。

如果张拉整体城市的人群让你感到焦虑，想要逃离，那就预订一艘私人飞艇，然后隐遁到浓云中去吧。飞艇只能容纳一人；如果你觉得舒适，也可以塞进去两人。飞艇从城市发射，你可以乘气流在云中漫游。小心不要被喷气流吹走。

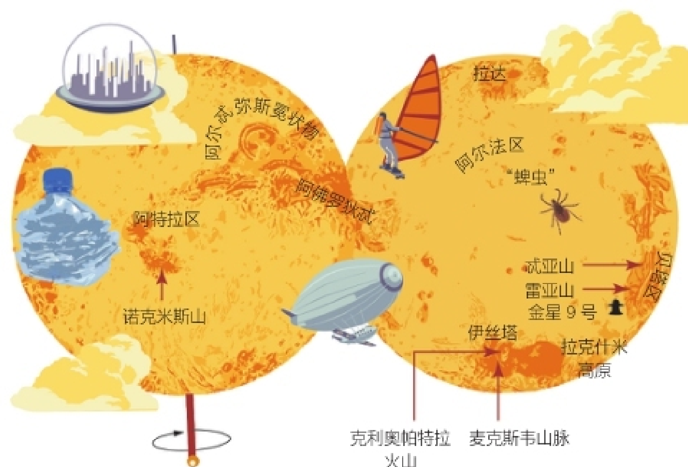
那些渴望近距离观察下方传说中的熔岩平原的人，请注意，飞到地面上就相当于在地球的海洋里下潜900多米，只不过温度是后者的30倍。在这种情况下，你需要一部看起来像潜艇但是有轮子的载具。在你巡游荒野的过程中，这个加固休闲车将是你的大本营。你需要一套能够禁得住魔鬼天气的空调系统。

有何好看| WHAT TO SEE

[伊丝塔地]

伊丝塔得名于巴比伦神话中的爱之女神，这是一座被陆地包围的岛屿。与地球上的大陆相比，伊丝塔地比澳大利亚大一点。在它的东部耸立着麦克斯韦山脉，其中一些山峰比珠穆朗玛峰还要高。它上面还坐落着萨卡加维亚和克利奥帕特拉两座火山。伊丝塔地中部是拉克什米高原（Lakshmi Planum），高度与地球上的青藏高原差不多。在巴比伦神话中，伊丝塔来到冥界，冥界女神让她在每一扇门前都留下一件衣服。如果你敢去探索伊丝塔，记得穿好你的衣服。如果不穿宇航服，你会在几次呼吸后失去知觉，不久就会窒息。

在空中及地面上，你都会有很多景色可看、很多事情可做。



[阿佛洛狄忒]

这块高地与非洲一样大，边缘挨着赤道，延伸到金星的南半球。你可以探访一下奥瓦达区（Ovda Regio）和忒提斯区（Thetis Regio）的两座高原。强烈的地震和地质构造压力导致大地产生了错位，在地面上形成了巨大的瓦状变形。山脊和悬崖纵横交错，构成了奇特的景观。

[阿尔法区]

阿尔法区以东的薄饼状穹丘是7个互有交叠的圆形山丘，看起来就像巨大的煎饼。它们又圆又平又大，表面有裂纹。薄饼状穹丘是一种类型独特的火山，在地球上并没有被发现。人们认为，它们是浓稠的熔岩从表面喷发、冷却并排出气体时形成的。要特别注意直径约30千米的蜱虫火山。从上方看下去，它周围的山脊和山谷就像蜱虫的腿。

[贝塔区]

这片高地上有两座大山，忒亚山（Theia Mons）和雷亚山（Rhea Mons）。尽管看起来一模一样，但忒亚是一座火山，雷亚不是。忒亚是一座盾状火山，拥有宽阔舒缓的斜坡，就像地球上的莫纳克亚山，由一层又一层的岩浆历经多年堆积而成。雷亚山及贝塔区以南，是宽150～250千米、最深处有5千米的德瓦纳深谷（Devana Chasma）。

[拉达地]

在海伦平原、拉维尼亚平原和爱诺平原的围拱中，这块周围没有海

洋的高地上有一些可爱的风景。你可以探访一下那些幽深的裂谷，在边缘凝望深渊。一定要参观奎特扎尔皮特拉特尔冕状物，这是一个由火山运动及地质构造运动形成的环。

[早期探测着陆点]

参观一下死亡机器人的残骸。1961年，苏联为了研究，向金星发送了探测器。但没有一台能够在严苛的条件下长久生存，而第一批没等发出任何有用的数据就被毁掉了。工程师们通过代价高昂的试错过程学会了如何建造可以忍受热空气的探测器。到了第8次尝试时，探测器可以在死亡之前支撑1个小时。金星9号和金星10号为我们提供了第一批表面照片。NASA的先驱者金星2号于1978年发射，在探测金星大气层后从其表面进行了短暂的信息传送。许多人喜欢参观失事现场，但是你要为即将看到的机器人残骸做好准备。

有何好玩| ACTIVITIES

[漫步云端]

尽管你不会呼吸到新鲜的金星空气，观景甲板却可以让你在城市的人工环境之外待一段时间。在浮城的高度上，压力与在地球上差不多，只要你的皮肤得到了充分的防酸雾保护，而且拥有可呼吸的空气源，你就可以不受笨重的加压宇航服的干扰，尽情享受金星云顶的风光。一定要查看天气预报和城市高度，确保你不会被淹没在浓密的硫酸云和大风中。严重的酸腐蚀肯定会搞砸一次非常愉快的户外散步。

[观星]

在金星的漫漫长夜中，你可以在云层之上观察地球。身处飞艇中观察太空也有缺点，偶尔会出现颠簸。你的望远镜需要复杂的稳定基座来保障平稳。双筒望远镜还算差强人意，用它看去，地球是一个略带蓝色的亮点。水星离金星更近，因此它在金星上比在地球上更容易观测，而火星则更暗。你也会看到月球。天空中的其他部分对于地球的观星者来说应该是非常熟悉的。

[巡游大地]

在金星的大地上漫游非常像在地球上扬帆冲浪，只不过没有凉爽的微风和波光粼粼的海洋。空气浓厚，踩着带有保护层的滑板，你可以轻易乘着缓慢的微风滑过尘土飞扬的大地。你需要大而坚硬的轮子去对抗锋利的岩石。如果技术过硬，你可以滑得比每小时十来千米的当地风速还快。亚特兰大平原是金星表面最大的盆地之一，非常适合把滑板带过去，平滑的地貌会使之成为竞速的理想场地。

[天然高压舱]

尽管这可能不是最吸引人的运动，但是许多来到金星云城的游客都喜欢压碎罐子或塑料瓶。第一步是在一根非常长的线的末端绑上密封的罐子或瓶子，然后朝表面投下去，就像甩出一条长长的钓鱼线一样。如果你把它放得足够低，它会到达一个压力较高的区域，瓶子或罐子会被压成一团皱巴巴的垃圾。如果把它放得太低，塑料瓶就会完全熔化。

目的地：火星

DESTINATION-MARS

谁不曾梦想踏上那颗红色星球？奶油糖果色的天空、巨大的峡谷和太阳系中最高的火山，让火星成了浪漫主义者和冒险家的绿洲。广袤而寒冷的沙漠充满了异域风情，却又让人感到不可思议的熟悉。它就像是某个启示录平行宇宙中的一个小型地球，海洋已经干涸，大气散逸殆尽，剩下的是灰尘、岩石和大量可以让你逃离地球重力和厚重空气的奢华度假村。

在火星上，你的腿脚会感到轻松，不过你仍然会站在大地上。火星表面的重力略大于地球上的三分之一。赤道附近的温度可以达到温暖的二三十摄氏度，不过大部分时间里，火星上的温度都在零下几十摄氏度甚至零下一百多摄氏度。如果你已经去过月球，准备好了迎接新的挑战，但是还没有准备好进行一次太过遥远的旅行（比如前往冥王星），那么火星是最适合你的目的地。

速览

AT A GLANCE

直径：略大于地球的一半

质量：地球的11%

颜色：棕黄色、褐色和锈红色

绕太阳运行速度：大约每小时8.6万千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的23千克重力

空气成分：非常稀薄，基本全是二氧化碳，还有痕量的氮气、氩气、氧气和一氧化碳

构成：岩石

光环：无

卫星：两颗

温度（最高、最低、平均）：35摄氏度、零下89摄氏度、零下63摄氏度

一日长度：24小时40分钟

一年长度：23.5个地球月

与太阳的平均距离：2.28亿千米

与地球的距离：5472万～4亿千米

旅行时间：大约200日可飞越

向地球发送信号的时间：3～22分钟

季节：严寒的冬季与凉爽的夏季

天气：间或有沙尘暴，偶尔有云

日照：略小于地球上亮度的一半

独特景观：太阳系中最大的火山奥林匹斯山和最大的峡谷水手峡谷

适宜：攀岩和低重力远足

天气和气候| WEATHER AND CLIMATE

如果你想逃离令人汗流浃背的酷暑，火星是一个理想的冰川度假胜地。火星到太阳的距离相当于地球到太阳距离的1.5倍，因此火星比地球冷得多。

火星上的季节循环与地球非常相似，因为这两颗行星的自转轴倾角相差不到两度，几乎可以忽略不计。然而，由于空气稀薄，火星上的季节更为温和，没有暴风雪、雷雨或者落叶（说到这个，树木也是没有的）。季节的变化是很细微的。随着季节的变迁，你可能会注意到阳光照射岩石的方式、风的强度和方向，或者云层的存在，都变得有所不同。最大的转变发生在两极，极地冰帽会随着阳光的变化增大或消退。

虽然自转轴倾角接近，火星绕太阳运行的椭圆形轨道却比地球的更扁。有些人认为地球与太阳之间的距离决定了季节，这是一个普遍的误解。地球与太阳之间的距离对季节影响不大，这是因为轨道接近于圆形，距离并没有太大的变化。而在火星上，除了自转轴倾角，它与太阳之间的距离也会影响其季节的面目，因为它的轨道更为细长。火星南半球在冬天的时候离太阳很远，因此那里的冬天很冷，而北半球的冬天就相对温和一点，因为离太阳更近。

无论季节如何，尘土都会一直伴随着你。它就像第二层皮肤，会覆盖到你的宇航服外面，还会给你的漫游车和定居点的密封状况，以及机械设备造成麻烦。频繁的沙尘暴有时会席卷整颗行星，挡住太阳。如果你陷入一场沙尘暴，最好的策略是在栖息地或车辆中寻求庇护并等待沙尘暴结束。尽管样子挺吓人，火星的沙尘暴其实并没有看起来那么可怕。在火星上，大气的密度只有地球的百分之一左右，所以尽管沙尘暴会让人看不见东西，会造成太阳能的中断，但是风更像是夏天的微风，而不是狂风。不过，有时在季节变化期间也会出现非常强的风暴，特别是在极地冰盖附近。

你偶尔能在火星的天空中看到云。它们大部分由水冰组成，因为色泽洁白而在橙色的天空中显得格外突出。火星的云层低而纤薄。幸运的话，你也可以看到火星上的雾。和地球上的雾一样，它们形成于低洼地区凉爽的地面附近，尤其是像水手峡谷那样的深谷中，而且也是等到太阳升起后就消失了。

尽管有那么多沙子，你在火星上不会找到任何像沙滩一样的地方。由于气压太低，液态水无法在表面上长期存在，就像在地球表面以上30千米处一样。在这样的条件下，哪怕温度远低于地球上的冰点，水也很容易蒸发。因此，流动的液态水是新奇之物，游客很愿意寻找这些天然而短暂的水流。它们是季节性的，主要出现在夏季。你可以在阿尔及尔盆地北部的海尔撞击坑内找到这些天然水流。

除了两极的冰盖里保存着的大量的冰，火星上大部分的水都在地表以下。如果你在火星上发现了水，可不要未经净化就饮用。它是咸的，也因此才不结冰，而且往往受到了名为高氯酸盐的化学物质的污染。它们可以用来制造火箭燃料，有剧毒。

何日启程| WHEN TO GO

无论何时去火星，你都有风景可以欣赏。冬天去北半球，看看面积达到峰值的极地冰帽。或者见证一下随便哪个半球的“无尽之夏”。那里的夏天并不是真的没有尽头，只不过时长大约是地球夏季的两倍——对于珍视暑假的学生和老师来说，这是个好消息。

在北半球的夏季，火星处于离太阳最远的位置，观云者可以在赤道附近观赏到大部分的云。如果你想完全避开多云的天空，可以在春、夏两季探访南半球，不过要记住，那时也是沙尘暴的高发时期。

漫漫长路| GETTING THERE

和前往任何一个相对于你的出发地而言速度总在变化的度假目的地一样，你需要仔细计划何时动身前往火星。地球以每小时10.7万千米的速度移动，火星则以约每小时8.6万千米的速度移动。想象一下，你的朋友在跑道上跑得比你慢，你在一条内道上，想抛给他一个球。当他在赛道的另一侧时，你是不可能抛球的。你需要预测他的运动轨迹以及球的运行时间，确定抛球的最佳时机。同样的道理，你最好等到地球和火星处于最有利的相对位置时再出发。

你现在可以前往火星——把它的坐标输入星际定位系统，然后一路高歌猛进，到达那里之后再来个急刹车。但我们不建议那么做。霍曼转移轨道是一条椭圆形的轨道，离太阳的最远点在火星，最近点在地球。

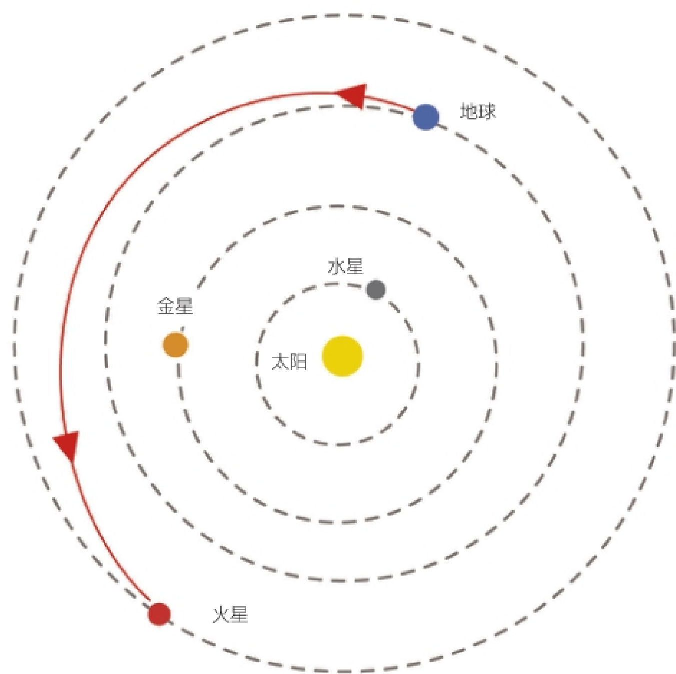
利用这条轨道所消耗的能量要少于说走就走、直来直去的路线，但是你需要等待发射窗口，等到两颗行星处于最佳位置，也就相当于你和你的朋友在赛道上并驾齐驱的时候再开启旅程。在简单的霍曼转移轨道飞行计划中，每隔25.5个月，或者一个火星年，会出现一次发射窗口。你动身的时间与理想发射窗口的相隔时间越长，到达火星所需的燃料就越多。

等你到了火星，你至少要等18个月才能有机会回家。如果你错过了返程航班，你可能需要在火星上停留3年半，等待两颗行星再次对齐。这大概算不上世界末日，因为这意味着假期更长了，而你的老板甚至无法和你争辩为什么你需要延长个人假期。

去火星旅行的另一个经济选项是搭乘奥尔德林循环轨道[11]。它就像是去火星的地铁线路。在奥尔德林循环轨道上的飞船会定期越过地球

和火星，利用地球和火星的引力助推节省燃料。

共享轨道上的飞船数量是没有限制的。沿循环轨道从地球到火星的单程需要147天。搭乘奥尔德林循环轨道的好处之一是它相对便宜，因为飞船需要很少的燃料就能留在轨道上——只要偶尔推进就可以了。



到达之后| WHEN YOU ARRIVE

从远处看，火星像是天空中的一小块红斑。随着你不断靠近，那团红斑会越来越大，你会逐渐看清它的面貌。留意一下在火星表面上的一条巨大深沟，这条峡谷被称为水手峡谷。等你打算仔细观察时，可以跳上穿梭机抵达它的岩石表面。火星上的红色岩石会令你惊叹，那种颜色并非火红，而是类似于地球上的锈色。那是氧化铁的颜色，说明这颗行星上曾经有流动的水。这里的景色看起来很像美国犹他州，但是光照在岩石上的方式又有些不同。你很快就会注意到，除了岩石，火星上还覆盖着一层细小的尘埃，无处不在，无缝不钻。尘土永远乘着风四处游荡，因为几乎没有湿气能像地球上的雨一样，将它们拍落在地。这里的尘埃滞留在空中，使得天空呈现出特别的橙色。

火星上的节奏与地球相似。这里的一天只比地球上稍微长一点，所以如果你一直希望每天能多一些时间，你终于可以如愿了。一个火星日比地球标准日长40分钟，这给了你足够的时间处理那些额外的任务，或者在沙丘间多待一段时间。为了便于从地球时间转换到火星时间，游客在抵达后需要将地球的钟表换成火星的钟表，后者使用比地球上略长一

点（确切地说是长2.7%）的小时、分钟和秒记录火星时间。

在火星上，一个太阳日（sol）代表火星上的一天，长度是火星上的24个小时（实际是地球上的24小时40分钟）。于是，火星上的今天（today）变成了“tosol”，昨天（yesterday）变成了“yestersol”。当你说到明天（tomorrow）时，会有三种表达：“nextersol”“morrowsol”“solmorrow”。小心别人会问你是不是在“soliday”（度假）。这些术语是由NASA的火星车操作员为了找到方法记录火星上不同寻常的时间流逝而创造的。



奥林匹斯山（前景）是火星上最知名的旅游景点之一。一定要探访与之相伴的三座火山：艾斯克雷尔斯山（左）、帕弗尼斯山（右）和阿尔西亚山（中），之后再去诺克提斯迷宫远足（图片左上角）。

——

欧洲航天局 / 德国宇航中心 / 柏林自由大学 / 贾斯丁 · 科沃特（Justin Cowart）

一旦着陆，你可能会想要打电话回家报平安。虽然在整个太阳系的大图景中，你离家很近，但是将信息传回地球还是需要一定的时间。根据两颗行星位置的不同，你向地球发送消息后等待回复所需的时间在4～44分钟之间。在这里，连上互联网是对耐心的磨炼。

在火星上的大部分行程里，你会在漫游车中越野。你需要选择车轮强劲的车辆，因为锋利的火星岩石很容易把它们变成废物。最基本、最经济的车类似于阿波罗任务中宇航员使用的那种——小型、完全开放，座椅看起来像草坪躺椅。你只需要穿上宇航服，坐进去，系上安全带。虽然乘坐起来令人兴致盎然，但这些车辆并不适于火星长途公路旅行。如果你想游历些地方，真正观赏些景色，你需要更大的车辆，一辆密封的露营车能让你把家带在身边。这种车辆的配置可以让两名乘客生存14天。

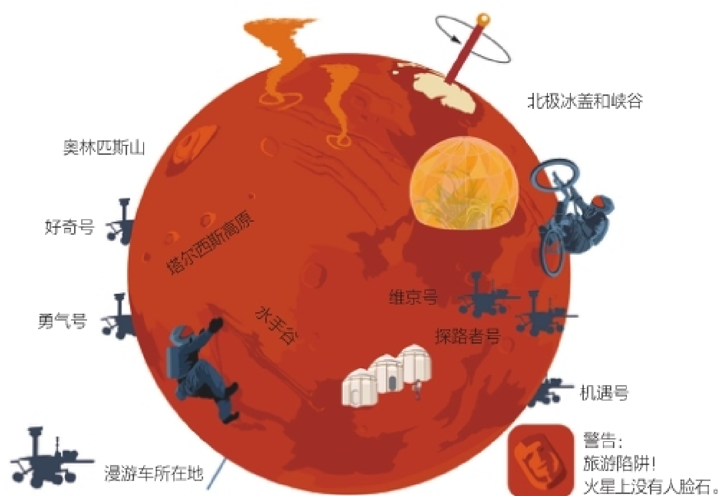
只要你拥有一台专门设计的可以在超稀薄大气中运行的飞行器，你也可以实现火星上的空中旅行。这里的重力较弱，一方面导致大气稀薄，另一方面也有助于飞行器停留在空中。飞行器上只能携带很轻的有效载荷，或者自身必须非常大，才能在稀薄的空气中产生足够的升力。

低温会使你在1火星分钟内冻僵，而且没有可呼吸的空气，所以如果你的漫游车坏了，悠闲的午后驾车就会变成危险的灾难性事件。为了确保自身安全，你最好遵循所谓的返程规则。只要你乘坐短程车辆离开受保护的定居点，就一定要时刻关注你的电量、氧气量和总旅行时间。绝对不要冒险走到你无法在氧气或电力耗尽之前回到安全地点的地方。世事无常，情况瞬息万变。

许多漫游车可以自主运行或者遥控操作。尽管如此，没有什么能比得上自己驾车自由。如果你打算在假期中租一辆车自驾，你需要接受专门的驾驶员培训。在地球上技术高超的司机可能会发现，如果没有平整的道路，他根本驾驭不了在尖锐的岩石和危险的悬崖间穿行的任务。

不同型号的漫游车各不相同，但是往往都具备通用的组件。一辆中程漫游车配有保护罩、导航计算机、温度调节系统、能够评估环境条件的传感器、能够控制方向的机械化肢体、能够移动的轮子或者履带、一台用于供电的动力源，以及一套通信系统。别管什么型号，它们跑得都不是很快。

不管是背包客还是历史爱好者，各种类型的访客都能在火星上找到探险的机会。



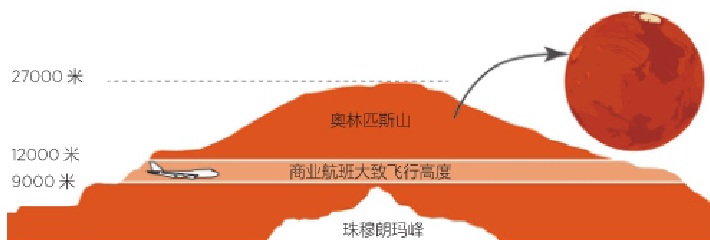
选择车辆时，考虑一下你要带些什么。仅仅带生存的基本所需，还是打算一路带着两吨稀有岩石？如果你计划携带重物，你将需要很多大轮胎来分散重量，以免车身沉陷。你还需要这些轮胎能在重压下变形，而不是只会硬邦邦、直挺挺地杵在地面上的轮子。

这就引出了我们的下一个要点：一定要检查你购买或者租用的车辆的轮胎。充气橡胶轮胎在火星上不能用，因为它们会在低温中破碎。最有可能的是，你的轮胎是一个气动替代品，它带有类似自行车车轮上的辐条，能够向轮胎提供一定的支撑。有些车辆上装备着底部带有小轮子的蜘蛛状铰链腿。它们可以像传统汽车一样利用车轮前进，也可以以行走的方式跨过大石头和厚沙地等障碍物。如果你需要挖掘或钻孔，可以把工具固定在其中一条腿上。

有何好看| WHAT TO SEE

[奥林匹斯山]

作为火星上的温和巨人，早已死寂的奥林匹斯山是太阳系中最高的火山。从底部算起，它两万米高的山峰远在250多千米之外，被附近的斜坡遮蔽得看不清面目。奥林匹斯山登顶是所有火星之旅的亮点。与地球上陡峭的山峰相比，它的斜坡很平缓，攀爬起来很容易，但耗时很长。你至少需要计划用一个月的时间来完成徒步攀登，而且要确保存有多余的补给。在奥林匹斯山边缘环绕一周的悬崖崎岖不平，你可以从南面或东面进入，那里的原始屏障没有那么陡峭。



[大瑟提斯高原]

火星上的深色斑点大瑟提斯是由荷兰数学家克里斯蒂安·惠更斯（Christiaan Huygens）于1659年首次标绘的，后来被天文学家们用来追踪火星的自转。因此，它得到了一个绰号——“沙漏海”。

如今在这个地区，销量最高的纪念品是沙漏，里面装满了大瑟提斯特有的深橙色沙子。科学家们一度认为这片地貌是蓝色的，上面长满了蓝绿色的植被。然而，那只是与其他更亮、更红的区域对比所产生的光学错觉。实际上，这里的深色来自未风化的火山岩。风把刚被侵蚀下来的、色泽更加鲜亮的沙子吹到了其他荒漠地区，留下相对光秃、色泽较暗的碎石。不过，由于这种误解，大瑟提斯也获得了另外一个绰号——“蓝蝎子”。

位于大瑟提斯这块黑斑西南部的是惠更斯撞击坑，这是火星上最大的撞击坑，面积和美国纽约州差不多大。和许多大撞击坑一样，惠更斯撞击坑由几个同心环组成。

[希腊平原]

作为火星上最古老的地区，这里斑斑驳驳地分布着太阳系早期遗留下来的许多撞击坑。希腊平原位于大瑟提斯南边，是一块明亮的圆形区域。在寒冷的冬日清晨，它被霜雾遮盖，会变成蓝白色，但这一效果是短暂的，中午前就会消逝。

[塔尔西斯高原]

由火山和地质构造运动形成的塔尔西斯高原幅员辽阔，面积比整个美国还要大。三座高高的火山坐落其上，它们被统称为塔尔西斯山脉（Tharsis Montes），又分别得名艾斯克雷尔斯山（Ascraeus Mons）、阿尔西亚山（Arsia Mons）和帕弗尼斯山（Pavonis Mons）。三座山峰都高于奥林匹斯山，但这仅仅是因为塔尔西斯山脉周围的土地本身就很高。艾斯克雷尔斯山比奥林匹斯山更容易攀登，因为你需要走过的距离较短，坡也不太陡峭。如果一直爬到山顶，你将欣赏到这座休眠火山的中心。火山口中有几个区域，熔岩冷却而成的岩石平滑如镜。

[诺克提斯迷宫]

诺克提斯位于水手谷西侧，这里布满了纵横交错的深沟。它们形成了一个迷宫，你在里面有可能迷失好几天。在其中信步漫游时，你可能会遇到山崩、沙丘和迷人的阶梯状岩石。层状台地会让你联想到美国南达科他州的崎岖之美。

[阿拉伯台地]

阿拉伯台地是一片古老的区域，坑坑洼洼交错排列。其中一些是撞击坑，还有一些是火山运动留下的痕迹。阿拉伯台地上有一大片色泽阴沉的沙丘，被风雕琢成了200多米高的险峻山峰。一些地区存在着沟渠，可能是已经干涸的古代河流或者小溪。

[水手峡谷]

火星旅程的高潮一定是前往火星赤道附近的水手峡谷之旅。它在20世纪70年代初被水手9号火星轨道探测器发现并因此得名，是太阳系中最宏伟的峡谷。这道巨大的裂谷宽达200千米、深7千米，是美国大峡谷的4倍深。它在火星表面延伸了1/4周，长度相当于美国东西海岸之间的距离。

峡谷边缘有许多优美如画的景色。其中人气最高的是俄斐峡谷（Ophir Chasma）和坎德峡谷（Candor Chasma）的交会处，在那里，你会发现自己几乎被陡峭的悬崖包围了。另一处知名景观在米拉斯峡谷（Melas Chasma）中部，或者说是科普莱斯特峡谷（Coprates Chasma）的最深处，那里的崖壁约有50千米远，而顶峰耸立在你上方1000多米处。

水手峡谷景观摄人心魄的原因之一，在于它和地球上的峡谷不一样，当尘埃落定后，空气中少有阴霾，而这一点，是因为火星上的大气更加稀薄。就像透过一扇刚刚擦过的明净窗户看出去一样，这里的风景看起来格外清晰明丽。

[极地冰帽]

那些挂念着涉水的人喜欢到极地旅行，不过那些地区可能很冷，尤其是在冬天。极地冰帽的旋涡形状是由风在火星自转和重力的助力下形成的。北极冰帽比南极冰帽大得多，主要由水冰组成，顶部有一层干冰。在那里有北极峡谷（Chasma Boreale），其崖壁被刻蚀成了一层一层的，就像缎带糖一样。冬天，大气中的二氧化碳冻结到水冰顶部，进一步增厚了巨大的冰层。到了夏天，被太阳照射时，干冰层受热升华，使得水冰暴露出来，可以供人采掘。季节变换的时候，极地会有强风。

[历史遗址]

你可以去参观NASA好奇号、勇气号和机遇号火星探测器的最后安息地。好奇号位于盖尔撞击坑中，那里能看到夏普山的美景。勇气号是在“本垒”地区西侧一个叫作“特洛伊”的区域里结束了自己的使命。而机遇号的安息地在子午线高原的奋进撞击坑附近。虽然这些探测器走过的痕迹早已随着风尘飘散，回溯它们的路线还是很有趣的。拿机遇号来说，它走过的路径比一次马拉松还长。

有何好玩| ACTIVITIES

[欣赏火星的天空]

火星的地貌会让人联想到地球上干燥的荒漠，但是只要你抬头看一看锈色的天空，熟悉感就会消退。在地球上，空气散射光的方式决定了天空是蓝色的。火星上的散射效果却有所不同，那里天空的色调来自尘埃颗粒而不是稀薄空气对光的散射。天空中太阳周围的区域比其他部分更亮、更蓝。

在那些田园诗般的宣传画中，你看到的火星的绚丽红色其实有点夸张。真正到场看一下的话，红色并不像明信片上的那样纯。仔细观察岩石，你会发现它们身上变幻着金色、黄褐色和棕色的晕彩。

火星上的日落有着令人赏心悦目的异世界风情。因为火星离太阳较远，太阳在火星上看起来比在地球上小。火星日落时的颜色与地球天空的典型颜色刚好相反——远离太阳的天空是红色的，而太阳周围的天空是蓝色的。光被灰尘散射，形成一个蓝色的热气球形状，而太阳就位于热气球的吊篮位置。火星自转的速度和地球差不多，因此太阳落山的速度也差不多，但是尘土飞扬的天空反射已经落山的太阳的光，使得黄昏持续的时间更长。在沙尘暴中，你看不到太阳落下的样子，只会看到太阳没入阴霾之中。

白天的火星天空或许奇异，但夜晚的天空就似曾相识了——那里繁星点缀。你能够分辨出在地球上看到的所有星座，只不过多了一颗星，而且并不是一颗恒星——那是地球，距离太阳第三近的大行星，从火星表面看上去是一颗泛蓝的光点。你可以在早晨或者傍晚的火星天空中看到它，甚至月球也是一颗可见的光点，陪伴着更加明亮的地球。

星座是相同的，但是身处火星的天空观察者可能会注意到星星移动的方式与地球上并不一样。在你的家乡，北极星位于北极的天顶，或者说地球的自转轴正对着它。它在天空中的位置保持不变，其他星星都缓慢地围绕着它旋转。因为火星自转轴所指的方向与地球不同，它的北极星是另外一颗。火星的北极星很暗，位于天鹅座和仙王座之间，难以用肉眼看到。不过火星有一颗明亮的南极星——位于船帆座的天社五。前

往火星南半球的游客会看到夜空在围绕着这颗恒星旋转。

[跳伞]

在火星的天空中跳伞比在地球上更危险。在地球上，由于空气的阻力，你最终会达到一个恒定的速度。这个速度叫作终极速度，为每小时195千米。在地球上，你自由坠落的速度永远不会比这更快。

在火星上，由于大气密度太低，你的最终速度将是地球上的5倍。你必须使用一组降落伞，更早地打开它们，而且它们必须大到足以将你的速度降到合理的水平。在地球上，你可找不到这般刺激的体验。

[攀岩]

水手峡谷令人瞩目的悬崖是考验你攀岩技巧的绝佳去处。如果你并不喜欢向上攀登，可以尝试在米拉斯峡谷的最深处攀绳而下。

你可能需要一段时间才能习惯在低重力环境中穿着笨重的太空服攀登。一些新手认为，由于重力较低，你掉下去也不会受伤，但这只是神话。也许一开始你跌落得很慢，但是当你掉到水手峡谷底部时，你的坠落速度仍然会让你像汽车挡风玻璃上的虫子一样惨死。

[追逐尘卷风]

即使没有沙尘暴，火星上的风也能造成麻烦。锥状的尘埃旋涡像龙卷风一样扫过大地，与它们在地球上的同行相比，这些火星尘卷风可以迅速盘旋成高达1000多米的巨塔，直径可达200米。如果你身陷其中，风不会太强，但是灰尘颗粒移动得非常快，可能会刮擦你的宇航服上的护面罩。在尘卷风中，你会看到带电的尘埃朝你发出微小的闪电。

[骑自行车]

火星是太阳系中少数几个可以骑自行车的地方之一。火星自行车的轮胎都很厚，可以让你行驶在崎岖的地表上，而不是陷入尘土中。车胎上也有纹理，好让车轮牢固地抓地。橡胶在低温下很容易损坏，所以在火星的低温条件下，自行车车轮是装有弹性辐条的车轮，而不是装有橡胶轮胎的车轮。

在火星的低重力条件下，控制方向会变得更加困难。要想转弯，你必须骑得慢一些，不能太急。如果不把前轮抬起来，想快点加速也是很困难的，因为重力小意味着车轮与地面之间的摩擦力小。不过好消息是，在铺设好的道路上，火星自行车手可以骑得更快，因为空气阻力几乎可以忽略不计。

[玩杂耍]

如果你正在学杂耍，火星是一个很合适的地方。这里的重力只有地球上的大约三分之一，这意味着你用同样的力量能把球扔得更高，从而实现一场缓慢但引人注目的表演。即使你把球扔到在地球上玩杂耍时的惯常高度，它们也需要更长的时间才能下落。如果你还没有充分提升自己的反应能力，你会有足够的时间来掌握动作，这无疑是个好消息。

附近有什么| WHAT'S NEARBY

火星有两颗小卫星，火卫一和火卫二，它们是支线游的好去处。火卫一绕火星运转一周仅需9个小时，每个火星日可绕三周。火卫二绕火星一周需要30个小时，不过方向相反。你在火星表面的位置不同，每一年里能够看到的卫星经过太阳的次数也不同。这些所谓的凌日可以被认为是小日食，但是太阳只有一小部分会被遮挡。在极少数的情况下，你可以看到两颗卫星同时在太阳前面经过，这一现象被称为双日食。



探访一下火星较大的那颗卫星，你在上面可以跳过地球上最高的建筑。

高解析度成像科学设备 / 火星侦察轨道器 / 亚利桑那大学月球及行星实验室 / 美国国家航空航天局

[火卫一]

虽然英文名取自希腊的恐惧之神，这颗卫星却是个令人愉快的去

处。它的周长只有70千米，你可以在几天内看遍它所有的精彩之处。如果你是一个有低重力经验的极限跑步爱好者，你可以在一天内绕着整颗卫星跑一周。比跑更有趣的是跳，你猛然一跃就可以搞定地球上最高的建筑——828米高的迪拜哈利法塔。

火卫一的轨道与火星间的距离比任何卫星与其行星间的距离都短。尽管在火星上看去，火卫一很小——大约是地球上满月大小的四分之一，但在火卫一表面上看到的火星却很大，是地球上满月大小的85倍。由于火星引力的拉伸和挤压，火卫一预计会在未来3000万～5000万年内崩落。来自火星的潮汐力在火卫一表面形成了浅槽，有时被称为伸展纹。这颗卫星的内部只是在重力作用下松散地结合在一起，并被包裹在多尘的外壳中。

[火卫二]

火卫一孪生兄弟的英文名（Deimos）意为“惊恐”，它是两颗卫星中较小的一颗，周长仅有40千米。微小的质量意味着表面重力非常低，仅相当于地球上的几千分之一。其逃逸速度只有区区每小时20千米，几乎任何人都可以把棒球一扔入轨。注意不要砸到登陆船。由于最轻微的跳跃都能让你飞起来，在火卫二上走路很有难度。你可以欣赏到火星的壮美景观，它的大小相当于地球上满月的33倍。从火星上看，火卫二比地球上看到的金星略亮一点。

[小行星带]

早期的太阳系是一片纷扰杂乱的地方，大大小小的物体你碰我、我蹭你。在今天的我们看来，太阳系中齐齐整整的八大行星沿着有序的轨道绕太阳运转，但其实行星之间仍然分布着零星的宇宙残骸。一种残留碎屑是小行星——太空岩石。低重力和不规则的形状使它们成了适合短暂停留的诱人所在。太阳系里的任何地方都能找到小行星，但是许多小行星都位于火星和木星轨道之间那个叫作小行星带的区域里。

小行星带是有着危险名声却名不副实的地方之一。小行星之间相距遥远，通常你只能看到正在探访的那个，如果只是经过，那么你闭着眼睛也能穿行其间。那里并没有很多东西——即便你汇集了当中所有的小行星，最终得到的那团物质的质量也不到冥王星的四分之一。

[谷神星]

仅仅一颗谷神星就占据了小行星带总质量的三分之一。它是小行星带中唯一的矮行星，如果不停下来欣赏一下它明亮的白斑，你的小行星带之旅便不完整。这些斑点中最亮的一枚位于巨大的欧卡托撞击坑中央。斑点是由咸冰蒸发后留下的硫酸镁构成的[12]。你可以采集一些送给地球上的朋友，它们可以作为浴盐使用。谷神星以罗马神话中的农业

和谷物女神命名，英语中的谷物（cereal）一词也源自这位女神。等你再吃玉米片的时候，考虑下一次去这颗矮行星旅行吧。

[灶神星]

灶神星的质量相当于冥王星的十四分之一，是小行星带中最大的非矮行星天体。拜访灶神星时，留意一下环绕赤道一周的沟槽。它们看上去像是火卫一上的伸展痕，但人们普遍认为这是由巨大的撞击形成的。如果你想要探险，可以去攀登雷亚·西尔维亚撞击坑的中央峰，它进一步证明了灶神星动荡的过往。同时，这座高达22千米的山峰也是太阳系中的最高峰。

目的地：木星

DESTINATION-JUPITER

木星是无可争议的行星之王。它将是你在太阳系外围拜访的第一个气态巨人，它会在那里看似平静地迎接你。它那彩缎环身的宁静形象给人一种错觉，木星是一颗风暴行星，以远大于太阳系其余行星之和的质量施展着自然的伟力。它的力量令人陶醉。

如果你是那种会被肆无忌惮的混乱吸引的人，木星绝对不会让你失望。这颗行星太大了，一个风暴就能装得下地球。在它的云顶，引力是地球上的2.5倍，磁场强度则是地球的两万倍。木星的磁层几乎延伸到土星轨道，一路用辐射影响着它的卫星。

虽然它那沙雕一般生动的风暴令人意乱神迷，但真正引诱你的其实是它的卫星。木星系统如同太阳系内的太阳系，当中的卫星和行星一般多种多样——有些甚至比行星还要大。

速览
AT A GLANCE

直径：超过地球的11倍

质量：地球的318倍

颜色：盘旋不已的红色、棕色、焦橙色和锈色

绕太阳运行速度：大约每小时4.7万千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的137千克重力

空气成分：浓厚，由90%的氢气、10%的氦气及一些甲烷和氨组成

构成：气体

光环：有

卫星：79颗

一巴高度处的温度：零下72摄氏度

一日长度：9小时54分钟

一年长度：大约12个地球年

与太阳的平均距离：7.79亿千米

与地球的距离：5.9亿～9.69亿千米

旅行时间：大约1.5个地球年可飞越

向地球发送信号的时间：33～54分钟

季节：无

天气：强烈

日照：不到地球上的4%

独特景观：大红斑、活跃的卫星

适宜：健身、观赏极光、卫星跳转

天气和气候| **WEATHER AND CLIMATE**

带上你最好的防风暴装备，准备体验风吹在脸上（面罩上）的感觉。木星上的天气永远不会无趣，这颗气态巨人身上的一切都比地球上的更极端。木星上的风速比地球上有记录以来的最高风速还要快每小时200千米。这里的风暴可以持续几十年，最著名的飓风“大红斑”（Great Red Spot）已经肆虐了数百年。天空中有许多闪电，它们要比地球上的闪电强大1000倍，雷声在天空中传播的速度则比地球上快4倍。在地球上根据闪电和雷声之间的秒数衡量雷击距离的方法在木星上并不适用。在木星上，风暴和你之间的距离将是你认为的4倍，雷声几乎难以辨认——不是低沉的隆隆声，而是被大气层中富含的氢和氦改变了音调而变成的可怕尖叫声。

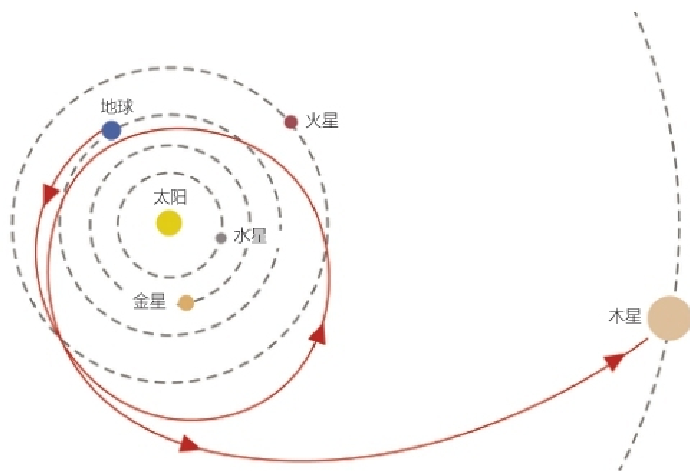
木星是自转最快的行星。在赤道附近的云顶，一天的长度只有10个小时。如果你睡了整个木星日，不要难过，这完全正常。因为木星没有固体的地面，白天的长度在赤道和两极是不同的。气体在两极移动较慢，如果你去极地，你每天会多拥有几分钟。在这个形态不定、动荡不止的旋转球体中，一天的概念是很灵活的。不过好玩的还不止于此。

这里很冷，太阳远在8亿千米之外，亮度只有从地球上看去的4%。木星实际上是由风暴构成的，但是因为它的自转轴倾角只有区区几度，在整个长达12个地球年的绕日旅程中，它的状况都能保持稳定。当你穿过木星明亮的云层升空或者下落时，温度会有变化。一般来说，天气预报都会告诉你，在气压与地球海平面相当的区域有大风，气温在零下一百来摄氏度。无论怎么说，这都算不上温暖，但是随着你不断走向太阳系外围，行星上只会越来越冷。

何日启程| **WHEN TO GO**

你也许会认为木星和地球最接近的时候是最好的发射时机，但如果你真的那么做了，等你抵达木星轨道时，它早就跑远了。因为地球的轨道半径较小，很容易就把木星甩在身后，因此每年都会有一个发射窗口供你进入霍曼转移轨道——最省油的直飞轨道。

木星常被用作将你甩向其他度假地的引力助推器。



木星上没有季节，一年到头天气都是一样的。大红斑正在缩小，也许会在未来几十年内消失，不过谁也说不准。最好别太相信自己的运气，尽快预订行程吧。

大多数游客会限制自己待在木星及其内侧卫星上的时间，因为那里的辐射水平很高。因此，很有可能你去那里花费的时间比在那里度假的时间还长。

漫漫长路| GETTING THERE

如果你只是途经木星，并借助其引力前往另一颗星球，你完全可以乘坐常规的旧式火箭在3年内抵达。如果打算停下来，就得多费些燃料。为了节省能量，你必须慢慢减速，匹配木星轨道——那里的平均速度是每小时4.7万千米。你将在离开地球5～6年后抵达。

如果你不着急，而且想尽量减少花费，你可以考虑乘坐离子推进火箭。这种火箭可以长时间提供一个较小的推力，让航天器的速度缓慢发生变化。一辆以离子推进为动力的汽车，从静止到加速至每小时100千米需要花费4天时间。离子发动机的推力虽弱，每小时32万千米的最高速度却能弥补这一不足。按照这个速度，你能在72分钟内从地球到达月球，只不过，你需要36.5年才能达到这个速度。而想用离子推进的方式飞行6.3亿千米前往木星，你要花费的时间比这短得多，几年而已。

到达之后| WHEN YOU ARRIVE

看到木星之前，你会先闻其声。抵达之前几周，在还有560万千米才能着陆的时候，你会到达木星磁层的边界。穿过边界时，你的无线电

将捕捉到超声速太阳风撞击磁层的声音，来自太阳的高能粒子会被磁层加热并减速。这种奇怪而尖厉的声音会在你的心头萦绕不去，提醒你自己已经离家亿万里。

毛骨悚然的感觉是暂时的。你会不断靠近行星之神，看着远处那个橙黄色的球体慢慢变大，直到大得不可思议，你会有种越来越舒适的感觉。没有任何东西能帮助你为亲眼看到它做足心理准备。有人说会联想到抽象的水彩画，还有一些人会想到热软糖圣代。静下心来，享受一会儿如梦似幻的全景。看着木星排列成条的气体舒缓地舞蹈，你很容易就会忘记时间的流逝。

何以代步| GETTING AROUND

在木星轨道上，你会体验到在飞行中已经习惯的微重力。在高轨道上研究木星的大气是一种非常可爱的度假方式。如果你有足够的勇气去仔细观察它狂乱的风暴，火箭飞船可以把你带到高空飞艇上。进入木星大气层时，你会感觉到自身的重量。这种不曾体验的沉重可能会让人感到压抑。即使你的飞艇可以停留在最高的云顶附近，你也会感受到数倍于地球的重力。

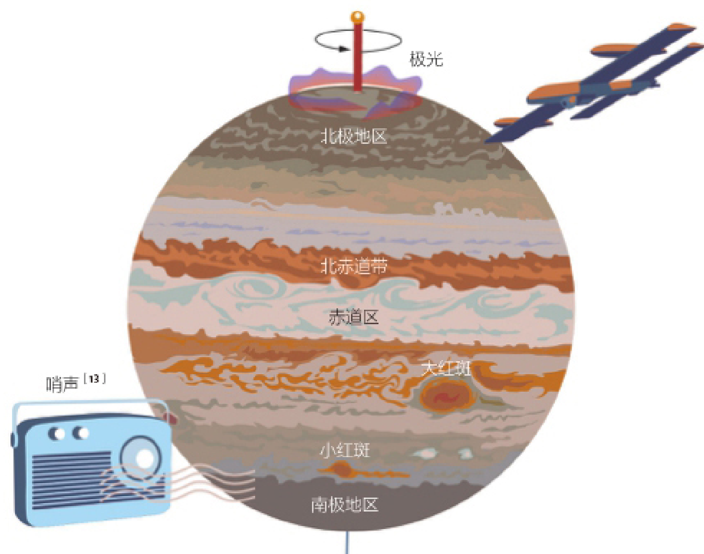
如果你降落到大气压力与地球相同的地方，你的体重将是在地球上的2.28倍。诀窍是一开始不要走动太多，躺下去享受这种沉重。有人说那种感觉就像一个坚定的拥抱，能够唤起安全感和平静。如果你能在足够长的时间内不让自己晕倒，从而掌握在高重力环境中运动的能力，你的肌肉会很快变得发达起来，这在回家的路上会很有用。

在你身心放松地穿过木星的天空之前，要先确保自己的辐射防护足够到位。水或者铅层可以保护你和你的设备。钛是重量较轻的选择，不过效果也会差一些。懂行的旅行者会携带一个放射量测定器，测量自己接触到了多少有害电离辐射。

你的主要交通方式是飞艇。在木星极轻的大气中飘浮要比在地球上更难。你需要使用热的纯氢气作为提升气体。氦气球在木星富含氢气的大气中会沉下去。小心不要把氢气和氧气混合起来，否则会有非常火爆的后果。

在度假过程中，你会花很多时间在木星的卫星上观光。在你动身前往那里之前，要确定你真的准备好离开木星了。这是一颗很难离开的星球，无论是从情感上来说，还是从物理学角度上来说。它有着巨大的质量，从它表面升空需要的能量要比从地球上发射多出5.5倍。你必须从大气中发射，这一事实更增加了挑战性。

近距离观赏木星的万千“气”象会让你感到迷醉。



有何好看| WHAT TO SEE

[大红斑]

你第一个想看的是大红斑，它吸引了成群结队的观光客。这个巨大的风暴有1.5万千米宽，可以轻而易举地装下整个地球。找到它不会有什么难度，因为它的纬度保持不变，总是位于一个叫作“南赤道带”的区域中。我们不知道它的成因，也不知道它的年龄，只知道自从被人类看到起，它便一直在那里。在地球上，它会被定性为20级飓风。有时你会在它旁边发现亮白色的椭圆形，而偶尔，它们会被吸入那个硕大无朋的气旋。

[带和区]

等你看够了木星汹涌滚动的红色巨眼，就可以拓宽视野，欣赏一下这颗行星风云翻滚、令人目眩的条纹。木星作为一个整体在旋转，风在加强整体运动方面也起到了自己的作用。每根条纹都代表一股强劲的急流，那里的风速大于每小时300千米。哪怕你有地方可站，风也会把你吹飞。木星上有两种类型的条纹：带（belts）和区（zones）。区的云层颜色很浅，较高的氨冰云闪闪发光。区中的风向与木星旋转的方向相同。而颜色较暗的带中云层较低，风通常逆着木星的自转方向。小心带和区之间的边界，那里的风在改变方向，你的旅程可能会很颠簸。仔细观察，你会看到气体条带的颜色随着时间的推移发生变化。当气体相

混、风向相抵时，通常呈现出亮白色的区域会变成黄橙色、深棕黄色或者红色。

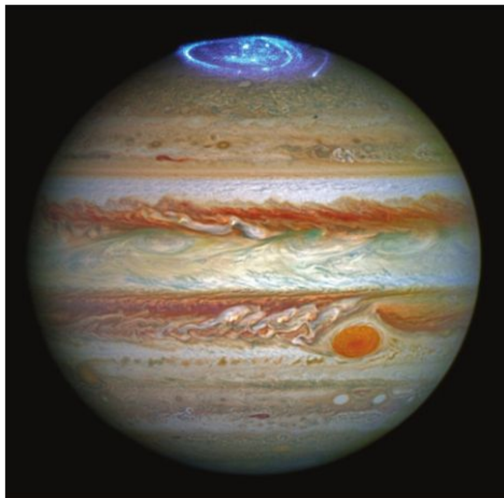


只有勇敢者才敢穿越大红斑这团比整个地球还要大的飓风。

美国国家航空航天局／喷气推进实验室／比约恩·永松（Björn Jónsson）

[领略大极光]

在飞向北极的过程中，你会穿过多条气体带和区，然后见识到最美的极光。在地球上，极光只会偶尔出现，你必须在正确的时间出现在正确的位置，才能邂逅那些发光的涟漪。而在木星上，极光永远都在，永远在两极，而且比地球上的极光强大1000倍。木星附近的辐射很危险，但是当带电的离子撞进高层大气，太阳系内最引人注目的极光便由此而生。强烈的蓝光在云间跳跃，用超自然的光芒照亮了整个天空。



木星上震撼人心的极光（在图片中以假彩色呈现）会令哪怕最困倦的太空游客心生敬畏。

——

美国国家航空航天局 / 欧洲航天局 / 哈勃望远镜

在木卫三上，你会看到更多的极光，这颗卫星本身有一个较小的磁场，红色、绿色和紫色的光幕伸展超过2000千米。如果你能站在它们下面，它们会填满整个天空，以每小时16000千米的速度移动——可以说是在咆哮了。

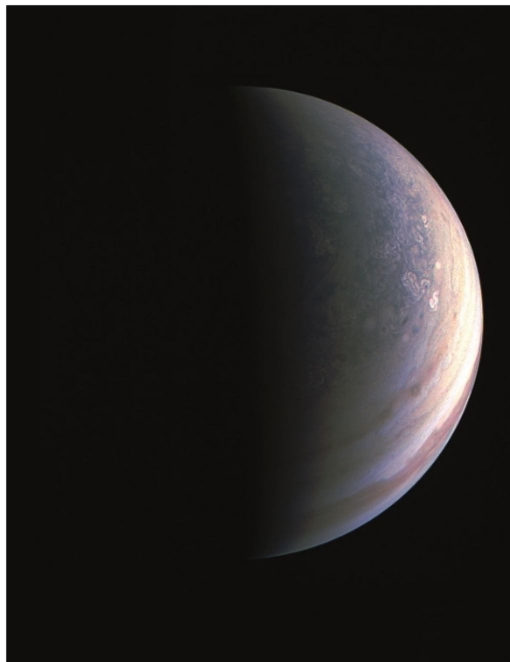
[北极]

如果你是梵高的崇拜者，你会爱上木星的北极地区。在这里，木星通常的带和区消于无形，只留下一片混乱的天空。不同的大气层次和蓬松的云层在混合时形成印象派的旋涡，你会注意到泛蓝的色调，这与你在游历木星过程中通常会见到的颜色不同。不要期望平稳地飞行，这里的大气到处都是猛烈的风暴，活像一片不宁静的雷区。

有何好玩| **ACTIVITIES**

[游览幽灵之环]

如果你拿木星的光环和土星奢华的光环比较，喜爱前者的人或许会有些微词，但是真正欣赏微妙之美的人，会十分享受木星的光环之旅。木星的光环幽暗、朦胧、稀薄，带着淡淡的红色，由微小的尘埃颗粒组成。主环几乎是透明的，而位于更远轨道上的光环更是薄如蝉翼。即使你穿过它们，也几乎注意不到什么。



木星的北极地区常被人们比为梵高的名作《星月夜》（*The Starry Night*）。

——

美国国家航空航天局／喷气推进实验室－加州理工学院／美国西南研究院／马林空间科学系统公司

[聆听迷幻的太空之声]

你可以利用无线电调频听听木星磁层的声音。它们每时每刻都在来来去去，活像个吵闹鬼。虽然肉眼看不见，绵延7亿千米的磁层却是太阳系中最大的奇观之一。如果我们能在地球的夜空中看见它，它将有5个满月的大小。

木星磁层源自木星磁场和太阳风之间的相互作用，磁场由在木星核心运转的金属氢生成，而太阳风不断将带电粒子流运送到附近。太阳风撞击磁场，产生强烈的辐射。木星的辐射带不像地球的范艾伦辐射带那么温和，因为它的磁场比地球强10～20倍。木星离太阳很远，然而它的磁场非常善于捕获来自太阳的带电粒子，这意味着该行星有着太阳系内最强的辐射。无线电中的声音会让你想起狮吼、哨声、呲呲声、啄木鸟啄树的声音或者海浪拍击海岸的声音。不过放心，木星上没有狮子，只有磁层中的电磁丛林。

[大气深潜]

深入木星奇异大气层的深处，你会遇到行事古怪的物质。在强大的重力和木星上层稀薄空气的作用下，你会下降得比石头还快。氨云盘旋在压力与地球相似的地方。再深一点，你就会嗅到一股氢硫化铵的气息。在这之下是一层白云，由你熟悉的水汽构成。水云与氨层发生碰撞，能够引发闪电。

当你下落到压力等于地球表面10倍的位置时——相当于在海洋中下潜90米，温度将达到66摄氏度。由于上方有厚厚的云层覆盖，这里已经是漆黑一片了。随着你不断下降，温度会继续上升。在深渊中坠落几个小时，温度将高到足以熔化铝。之后不久，你将面临千倍于地球表面的压力。这就相当于到了马里亚纳海沟底部，距离海平面10000多米。你的飞船也许能撑到这个位置，但是如果你继续下潜，你就没有希望了。随着你的下降，压力只会增加，你的飞船很快就会内爆。你开始深潜10个小时之后，就连载具中的钛都会熔化，然后蒸发，变成木星老爹的一部分。我们建议你在发生这种情况之前回头。

但是，如果你有一艘无比强大的船只，还可以继续呢。上层大气由氢气组成，密度比地球大气低很多。当你下沉时，气体汤会变得稠密起来。当压力达到地球上的50万倍时，你会发现周围的物质——氢，更像液体而不是气体。继续前进，你会看到金属氢，这种物质被挤压得过于紧密，电子都脱离了原子并且可以自由移动。你可以像在水中一样轻松穿过金属海，但是能见度很低。有传言说这里会下钻石雨。

[租个探测器]

如果木星的恶劣天气令你紧张，你可能会考虑用自己的探测器穿过它狂暴混乱的大气层。在附近某颗卫星上的控制中心，你可以租用一部装有摄像头和传感器的探测器。你将通过半实时的视频流近距离观赏木星奇异的色彩和风暴。

如果擅长驾驶，你就可以让你的探测器坚持尽可能长的时间。你可以驾驭着它，躲避闪电和辐射爆。一定要记住，如果你潜得太深，探测器终将爆炸。要是发生了这种事情，你的押金可就收不回来了。

有些人沉迷于这些机器人探险家，他们一部接一部地租，直到把整个大气层都探遍，结果无非是发现了一些新的斑点和风暴。在木星，探索是永无止境的。

[观看彗星坠落]

1994年，苏梅克-列维9号彗星在离木星很近时，以21.6万千米的时速坠入木星大气层，其撞击所产生的能量相当于地球上所有核武器同时爆炸的600倍。最大的碎片直径达2000米，在云层中形成了巨大的裂

痕，令下层大气暴露在外好几个月。木星的巨大引力导致撞向它的小行星数量远远多于撞向地球的，而且撞击的力量更大。这种撞击会在云层上方形成巨大的热柱以及在大气中快速传播的涟漪，后者看起来就像鹅卵石掉进水潭时激起的波浪。



木卫一表面布满了火山。

美国国家航空航天局 / 喷气推进实验室 / 美国空间科学研究所

附近有什么 | WHAT'S NEARBY

在木星的79颗卫星上，你能找到太阳系中最不寻常的一些景观，从大卫星的火山和地下海洋，到小卫星的奇特形状和颠三倒四的轨道角度，应有尽有。有些卫星只有1000多米宽，非常适合进行短期低重力远足和卫星跳跃。

你会很想去著名的伽利略卫星旁边看看，它们就位于离木星最近的四颗卫星之外。这一组由伽利略于1610年首次发现的卫星，被赋予了希腊神话中宙斯的情人们的名字：伊奥（木卫一）、欧罗巴（木卫二）、伽倪墨得斯（木卫三）和卡利斯托（木卫四）。它们是人类发现的第一批围绕其他行星运转的卫星。除了最远的木卫四，其他三颗卫星上都有危险的辐射环境。在离开有防护的飞船和住所去冒险之前，一定要将你的个人辐射探测器带在身边，并仔细检查你的辐射屏蔽。只有在美好的木卫四这颗距离木星180多万千米（4倍于地月距离）的安静岩石卫星上，你才能脱离令许多游客因为担心自己沉浸在辐射之海中而备受困扰

的“辐射焦虑症”。

这几颗卫星的运行周期有着令人愉悦的协调性，它们绕行母星的节律也很讨喜。所有的伽利略卫星都被潮汐锁定，公转过程中只有一面对着木星。最接近木星的木卫一仅需42个小时便能绕木星运行一周。接下来是木卫二，翩然一周需要2倍的时长，或者说是3.5个地球日。木卫三的公转周期是木卫二的4倍，木卫四的公转周期则是最长的，差不多17个地球日。

要想前往这些卫星，任何时候都是出发的好时机，因为它们都已经被永久地锁定在了木星赤道面中。能够了解这些迷人的球体肯定会是你木星之旅的亮点。

[木卫一]

在安全的距离上绕着木卫一飞行，你将看到一团橙色、棕色、黄色和黑色相间的“糨糊”，你甚至可能会觉得它像一个被烤过了的比萨。这颗卫星是火山爱好者的“香格里拉”，这里到处都是火山、间歇泉和熔岩，太阳系中最壮观的喷发景象就在这里。

由于恰好位于木星其中一个辐射带中间，木卫一上的辐射比其他任何卫星上的都要高。火山的猛烈爆发将钠和硫离子高高地抛入太空，留下了一道电离粒子的踪迹。它们与木星强大的磁场共同作用，在木星周围产生了一个带电等离子体环。这个等离子体环在两极地区产生了耀眼的极光。木星的磁场也会在木卫一上激发电场，产生300万安的电流，这反过来又会在木星大气层中引发闪电。

木卫一上的火山形成于各种形状及大小的裂缝中。你会看到火热的湖泊、熔岩河流和破火山口——中央凹陷的火山山丘。巨大的火山向太空中吐出伞状的尘埃和气体柱，为地表点缀出白色、黄色和红色。火山喷发后，二氧化硫结霜，这会让你奇异地联想起寒冷冬夜里刚下过的雪。任何时候，木卫一上都有100个火山口正在喷发。造成这幕火热景象的是它相对于木星及其姐妹木卫二和木卫三的运动所产生的强大潮汐。百米高的潮汐并不罕见。压抑的能量在释放时，地表会开裂，持续不断地喷出二氧化硫气体和熔岩流。

在这片火热的大地上四处走动是一项颇有风险的活动，不过，在木卫一上，熔岩造成的威胁并没有辐射大。游客接触到的辐射量是地球上日常生活中的5万倍。你应当仔细记录自己的辐射暴露情况。准备足够的水，因为火山活动已经让这颗卫星变得十分干燥了。准备好在容易开裂的不稳定地面上游历，你将跨过炽热的灰烬，从一块岩石跳到另一块，你还将横步闪身，避开能轻易把你的假期打断的隐藏间歇泉洞。

你将在洛基湖开启你的木卫一之行。这个巨大的熔岩湖得名于北欧神话中那位形态善变的神。从空中俯瞰，它像块马蹄铁，黑暗的液体拥

抱着一块高地。直径202千米的洛基湖是木卫一上最大的火山洼地，因其面积较大，它一般被称为岩浆海而不是熔岩湖。别管你怎么称呼它，都不要离它太近，因为岸边那些发光的岩石会破裂，让你掉进火坑。来自洛基湖的热量在地球上都能够被看到，你可以把自己去那里的准确时间告诉地球上的朋友，这样他们就可以通过望远镜看着它，知道你正在经历终生难忘的冒险。洛基熔岩释放的热量，比地球上全部火山释放的热量加起来还要多。

洛基湖的西南部是雷，一座800多米高的美丽火山。从它的中央熔岩池处，状如脉络的峡谷向四周延伸。它以低黏度的熔岩流和高喷发率而著称。

洛基湖以东2000千米，相当于从美国旧金山市到丹佛市的距离之外，是以创造夏威夷群岛的火山女神的名字命名的佩莱火山。它的周围环绕着一个差不多和美国阿拉斯加州一样大的红环，中心是一片30千米宽的熔岩湖。1979年，旅行者1号飞船在夜间飞越此地时，捕捉到了300千米高的火山烟柱的图像，这是人类首次意识到木卫一上仍有地质活动存在。

火山旅行很危险。你可能会遇到热喷出物、山崩和有毒气体。你可能有机会见识到烈焰之泉——从远处看通常是安全的，但是请记住，任何时候都有可能发生任何规模的火山爆发，而此前毫无征兆。

从佩莱火山出发，你可以向南走到一个叫作多瑙河高原的巨大台地，它得名于宙斯的情人伊奥（木卫一在西方的名字的由来）曾经穿过的那条河流。这座5.5千米高的山宽244千米，一条近25千米宽的峡谷从中间将其分成两半。你可以徒步穿越峡谷，观赏令人心动的景色，但是要小心，西缘容易发生山体滑坡。

向东行走大约3200千米，你会遇到普罗米修斯火山。这座得名于把火带给凡人的希腊天神普罗米修斯的火山已经喷发了好几十年。这是一座喷发相对缓慢却稳定的火山，周围环绕着流动的熔岩场和明亮的二氧化硫残余物。它能将熔岩抛到400千米的高空，如果你恰好在那个高度上绕着这颗卫星飞行，可能会与它来一次意外的近距离隔窗相望。

[木卫二]

木卫二是距离木星第六近的卫星，它比冥王星略大，是一颗冰封的严寒星球。对于攀冰爱好者、深海潜水员以及任何对地外生物感兴趣的人来说，它是一个世外桃源般的所在。木卫二地质活跃，拥有间歇泉、冰火山和30米高的潮汐。

俯瞰木卫二时，你会看到它的白色表面上刻着一些奇怪的痕迹。这些痕迹是覆盖全球、厚达10～30千米的冰层上的巨大裂缝。仅为地球重力13%的低重力会将喷发的冰柱高高送入天空，而冰下的海洋水量比地

球上的所有海洋中的水量都要多。

在木卫二旅行时，你需要时刻关注自己的辐射状况。小心对待表面上的旅行，就像潜水员在地球海洋中探索时，需要控制时间并留意深度以避免减压一样。你在木卫二表面上面临的暴露风险可能会让你在几天之内丧命，因此，待在冰层下更安全，至少你有了一层抵御辐射的天然屏障。

这颗卫星上到处都是水冰，你可以将其加工成饮用水或燃料。如果你想喝饮料，我们的建议是参与一次用带有航天局特色的茶具进行的日式传统茶道活动。这个想法来自地球艺术家汤姆·萨克斯（Tom Sachs）[14]，它将有助于你在零下数百摄氏度的严寒中保持温暖。在这样的温度下，覆盖着木卫二的冰就像岩石一样。

你在这颗冰封星球上的第一站是普维尔撞击坑，它的名字来自中世纪威尔士传说中的英雄。这片很明显的凹陷位于面向木星那一侧的冰面上，25千米宽的撞击坑中央有一座约600米高的山峰，在饱受剥蚀的300米高的外缘中高高耸立。木卫二上许多以凯尔特神话中的人物名字命名的撞击坑，都像这样慢慢消失了。

在普维尔撞击坑，你可能会考虑在几十千米厚的冰层上钻孔，探索木卫二冰下海洋的热液喷口。你可以租一艘私人潜艇、上潜水课，或者用潜水机器人在水中航行。或者，你也可以径直向北到达康纳玛拉混沌区域，一片以爱尔兰西部某地的名字命名的冰面形态。这是木卫二表面上的五个混沌区域之一——所谓的混沌区域就是一片由冰脊、裂缝和平原组成的地貌。这一相对年轻的地貌，是因为冰壳移动时，水从下面涌出冰面，破冰成块，令其融化后重新冻结而形成的。

普维尔撞击坑的东南方向是阿格诺尔纹线，它相当于木卫二上的圣安德烈亚斯断层（位于美国加利福尼亚州的巨大断层）。这是一条1414千米长、20千米宽的明亮条带，其光滑的路径是进行雪地漫游车比赛的理想场地。

在阿格诺尔纹线的尽头，你会看到瑟雷斯暗斑——木卫二上最大的暗斑。花点时间回想一下科幻作家亚瑟·克拉克（Arthur C. Clarke）在《2001太空漫游》（2001: A Space Odyssey）中描绘的巨大黑色方碑。在这本书中，木卫二被描绘成一颗可能藏有智慧生命的神圣卫星。

瑟雷斯暗斑的西边是锡拉黄斑。那里有一个冰下湖，非常适于放松几天，然后继续进行探险。蒸个热水桑拿，然后跳进湖里冰浴。旅程结束前，不要忘记收集一些木卫二海盐。你可以将其撒在巧克力冰激凌上品尝一下，体验一回真正的木卫二美食。

[木卫三]

在木卫二之外40万千米处的轨道上运行的木卫三是一颗奇怪的冰卫星，它有着优雅的明亮旋涡图案和支离破碎的黑暗地形。它以相当于木卫二一半的速度绕木星公转，因此，你可以趁着木卫二超越它的时候跳转过去。这是一颗梦幻般的卫星，浪漫主义者的庇护所，闪烁的撞击坑有如繁星一般点缀着它斑驳而流动的表面。它的北极覆盖着一层薄薄的霜盖。木卫三是太阳系中最大的卫星。如果你在这里待上一个星期，你就可以在它公转一周的过程中欣赏到木星360度的全景。

参观木卫三时，你很快就会熟悉一种在地表纵横交错的奇怪凹槽，这种会让人联想到大脑表面凹槽的地貌，被称为“脑沟”（sulci）。它们拔地而起600多米，绵绵蜿蜒几千米。你可以沿着地势，乘坐防辐射漫游车旅行。这里的辐射水平远低于木卫一和木卫二，但是仍然比地球上高。它有一个弱磁场，这在卫星当中并不常见。它弱得抵挡不了危险的太阳风，不过倒是会在木星的磁层中引发令人愉悦的小波动，并让木卫三的天空中布满微弱的极光。在木卫三上，每过一个地球日，你接收到的辐射量就相当于地球上一整年的13倍。这里有一层由氧气构成的稀薄大气，但是比地球上稀薄1000倍。

人们很容易就会忘记木卫三上的黑暗区域是由冰而不是岩石构成的。“脑沟”的团块结构表明冰层下潜藏着岩石，它有数百乃至上千千米厚。如果你挖得足够深，就会发现一整片地下海洋。

木卫三没有木卫一那么危险，但是在遥远的过去，它可能有过喷发水、甲烷或氨的冰火山。这些火山喷出的水流可能和你在木卫一上见识过的热流一样危险。

[木卫四]

在伽利略发现的卫星中，唯有木卫四能让你放松一段时间，不用担心过高的辐射。远离了木卫二冰冷的深渊和木卫一地狱般的火山，在你巡游木星小卫星的过程中，这里是一个可以称为“家”的好地方。

游客会选择的其中一个落脚点是庭德尔撞击坑。这个70千米宽的大坑得名于北欧神话中的神。陨石撞击时，地表以下数千米处的物质被翻了上来，造成了中央的一片混乱。洛芬撞击坑位于南极附近，是木卫四上最大、最年轻的撞击坑之一，中心环宽180千米。作为一个以北欧神话中婚姻女神的名字命名的撞击坑，洛芬是很受欢迎的结婚场所——当然，只要你的朋友们愿意远赴6.3亿千米的距离。洛芬撞击坑很浅，只有六百来米深，周围有明亮的辐射状线条，可以在空中观察到。它被侵蚀的边缘坡度平缓，可以成为长婚礼队列的理想选择。你还可以考虑停下来看看470千米长的吉普尔环形山链，它是由于一颗彗星在木星引力的拉动下破碎而形成的。

离开木卫四之前一定要在瓦尔哈拉停留一下。它是太阳系中最大、最壮观的撞击坑，几乎有4000千米宽，比水星上的卡洛斯盆地还要大，

几十个同心的环形山脊从撞击中心点向外延伸。

[木卫五]

如果你想脚踩大地看到最宏大、最壮观的木星景象，没有哪里比内卫星更合适的了，它们的轨道比伽利略卫星更靠近木星。其中最大的木卫五，是以希腊神话中一位仙女的名字命名的。这颗红色的冰碎石堆是距离木星第三近的卫星。从这个有利的位置看去，木星占据了四分之一的天空，大到足以让你轻松欣赏汹涌的云层和大红斑。你将在大约12个小时内绕木星运行一周，但是由于木星的平均自转速度更快，且与木卫五的公转方向一致，你需要一段时间才能看到它的整个面貌。这颗卫星的轨道差一点就碰到了木星的其中一个光环——阿玛尔忒亚薄纱环。这个环是由从木星表面剥离的灰尘构成的，纤薄如若无物，虽然木星的其他环也很暗淡，阿玛尔忒亚薄纱环却比它们还要暗10倍。

[木卫十三]

从木星向外数，木卫十三正好是幸运的第13颗卫星。在这个黑暗的世界里走走吧，它只有10千米宽，面积大约相当于日本的冲绳岛。木卫十三可能是一颗较大的小行星破碎后形成的。尽管它的轨道距离木星1100多万千米，木星在它的天空中看起来比地球上的满月大40%。在长达240个地球日的公转周期里，木卫十三的轨道为你呈现了在更适合观光的伽利略卫星上永远看不到的木星景象。

[特洛伊群小行星]

这个巨大的小行星群位于木星轨道前后各60度处，在木星绕太阳运行的过程中庇护着它。超过100万颗特洛伊小行星的直径超过800米，它们聚集成两组，分别位于L4和L5，即相对于木星和太阳来说静止的两个拉格朗日点处。

虽然被统称为特洛伊，但只有L5拉格朗日点的那一群才叫特洛伊，L4的那一群则被称为“希腊”。希腊集团中有一颗小行星得名于特洛伊间谍赫克托，而特洛伊集团中的一名成员则被赋予了希腊间谍普特洛克勒斯之名。木星并不是唯一拥有这种岩石同伴的行星。金星、火星、天王星、海王星，甚至地球都有特洛伊小行星，它们分别在各自行星与太阳的拉格朗日点上与行星共享轨道。

目的地：土星

DESTINATION-SATURN

土星是太阳系中的宝石，它有着图案复杂的光环、万花筒一般五彩缤纷的云景和一个神秘的六边形旋涡。谁能想到这么一大团气体会如此平静呢？你会在它轻盈大气中的高大、蓬松的云团里穿行，那里的重力比地球上低一些，会让你感觉到熟悉。

土星满足的是愿意多走几步（很长很长的几步）到达那里的旅行者，以及打算近距离观赏土星光环的资深太空度假者。它的许多卫星和小卫星[15]拥有多种多样的地貌——从小小的冰块到像行星一样大的岩石球体——能让你在其中嬉戏或得到放松。此外，你还可以在太阳系最迷人的卫星之一——土卫六上享受海滩远足。

速览
AT A GLANCE

直径：超过地球的9倍

质量：地球的95倍

颜色：黄棕色染着一抹橙色，偶有泛蓝的点缀

绕太阳运行速度：每小时3.5万千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的55千克重力

空气成分：浓厚，96%的氢气、3%的氦气，痕量的甲烷、氨气、氘化氢和乙烷

构成：气体

光环：有

卫星：62颗

一巴高度处的温度：零下139摄氏度

一日长度：10小时40分钟

一年长度：超过29个地球年

与太阳的平均距离：14.34亿千米

与地球的距离：12亿～16亿千米

旅行时间：3个地球年可飞越

向地球发送信号的时间：67～93分钟

季节：与地球类似，但持续时间较长

天气：间或有大型风暴，风力强劲

日照：亮度约为地球上的1%

独特景观：壮观的光环、神秘的北极六边形

适宜：跳伞、光环游、卫星运动

天气和气候| WEATHER AND CLIMATE

在地球上，天气产生于我们的上方。而在土星上，因为风暴的生发不拘上下，天气呈现出独特的模式。这里没有大地，没有能让雨水浸透的泥土，没有能让闪电击中的树木，只有堆满浓云的天空、无情的风和席卷全球的风暴。在空中上浮或下潜时，你会焦躁地渴望了解天气如何变化。和木星大气一样，土星大气主要由氢和氦组成，并含有微量的氨和甲烷。在顶层，雾霭沉沉，冰冷彻骨——这里有零下一二百摄氏度，厚厚的氨云仿佛给土星包上了一层奶油。当你下降时，温度会上升到零下70摄氏度，你会看到氢硫化铵云，它的颜色更接近红褐色，就像木星上的云一样。再往下，就在压力和温度升到令人不快的程度之前，你会遇到地球上那种熟悉的水冰云。

土星距离太阳15亿千米，比木星稍冷。在压力和地球上一样的高度，土星的平均气温在零下139摄氏度。虽然土星的质量比木星小很多，重力也较低，但它表面上也分布着向东流动的区和向西流动的带。土星的昼夜长度也与木星接近，只有10小时40分钟。

在土星上是很容易被风吹跑的，赤道附近的风速可以达到每小时近2000千米。一年是漫长的，相当于近30个地球年，27度的自转轴倾角引发的季节变化会触发恢宏的天气模式。北半球的春天以1土星年一次的风暴锋而闻名，就像一滴落到水中的食用色素，风暴锋扩散着、旋转着，让整个星球乱流激荡。它们引发的闪电比地球上的闪电强烈1万倍。要尽量躲避，不过，只要你身在导电金属飞行器中，你就是安全的，就像在地球上闪电击中飞机一样，封闭的框架是一个能够保护你的电屏障。炽热电击产生的真空使得空气快速移动，发出雷声。就和木星上一样，土星上的雷声不是令人欣慰的隆隆声，而是被土星天空的低密度气体扭曲了的高频啸鸣。

何日启程| WHEN TO GO

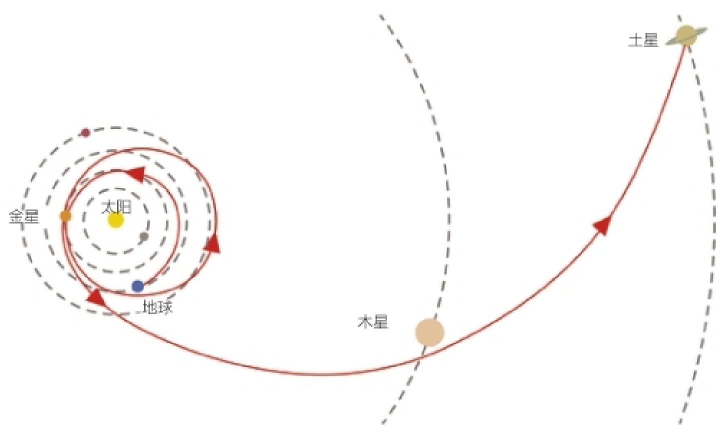
探访土星的最佳时机是木星能够提供强大引力助推之时。两者之间出现有利位置关系的时机大约每20年出现一次。出发之前，你需要向当地的跨星系旅行社咨询下一个发射窗口。春天是拜访土星的绝佳时机。经历了7年的冬季后，北极的六边形形态会更加鲜明。些许变强的阳光会让土星上的气体运动起来，引发美丽而狂乱的风暴。

漫漫长路| GETTING THERE

如果你想尽早到达土星，而且并不害怕乘坐由1000枚核弹驱动的飞船，你可以考虑恢复被称为“猎户座计划”的宇宙飞船设计，该项目的蓝图是20世纪60年代初NASA数千名工程师的智慧结晶。如果一切顺利，

你从外层空间接收到的辐射水平将超过你从核弹动力飞船中接收到的辐射水平。如果你选择这个方案，你将乘坐化学火箭从地球出发，到达太空后再与另一艘特殊飞船会合，以免地球居民在你起飞时暴露在因爆炸而造成的落尘中。

受到卡西尼探测器的启发，图中所示的旅行路线会利用木星的引力助推让你在假期结束之前抵达土星。



如果你倾向于乘坐更传统的火箭，它能在不到10年的时间里完成13亿千米的旅程——前提是你带的东西不重。要想到达这颗星球，你可以在途中利用地球、金星或者木星的引力助推。借助内行星的引力助推前往外行星似乎听起来不太现实，但其实如果这么做的话，你在推力方面获得的收益可能会弥补增加的里程数，而且你还得到了拍摄风景照的好机会。

到达之后| WHEN YOU ARRIVE

接近这个褐色的气态巨人时，你首先会注意到它美丽的光环。从远处看，那些环似乎坚实、平整而宁静。随着你逐渐接近，你会发现它们坚实的外观其实由单独的碎片组成。在这些飘浮的太空冰山中，有一些比建筑物大，还有一些非常小。它们在重力的作用下围绕土星运行，距离土星越近，速度越快。在某些环与环之间的大空隙中，你可能会看到一颗小卫星。

你还会注意到它的扁球形状。没有一颗行星是完美的球体，然而土星的中央隆起要高于平均水平。由于其高速的自转，土星赤道的直径比两极间距宽10%（地球的这个比例是1%）。

随着你不断靠近土星，你会很难相信那些云不是视错觉，不是悬浮在太空中的水彩画大师之作。各种颜色来自痕量的甲烷、氨和其他气

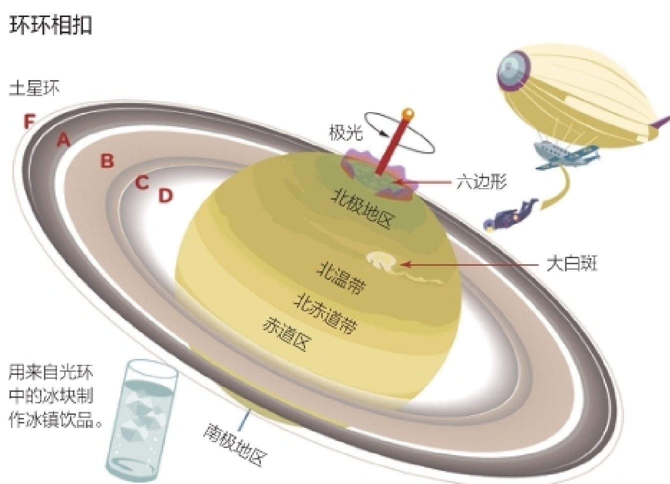
体，并在整个土星表面排列成带和区。离赤道越近，带和区便越宽，每一根条纹都代表着大气层中一道独立的喷射流。走近一点，你会看到旋转的泪珠状风暴。

你可能会想在它的大气层中来次短途旅行，以便近距离观察那些形状各异、大如地球的纤弱云团。最上层的云由氨构成，色泽明亮，由于云中含有微量的硫，又使得它带有柔和的黄褐色调。这是一种天然的雾气，是这颗行星的固有特征，早在人类出现在地球上并制造出喷烟吐雾的汽车之前数十亿年就已经出现了。

何以代步| GETTING AROUND

宇宙中最轻的元素氢占据了土星天空的96%。如果有可能把这颗星球放在一个巨大的浴缸里，它会因为密度比水小而浮在水面上。因此，乘坐飞艇旅行是一项独特的工程挑战。在地球上，因为氢气比我们（相对）沉重的空气轻得多，它可以浮起大型气球和飞艇。而在土星上，升空的唯一方法是使用加热的氢气，因为其密度小于周围较冷的氢气。听起来很危险？不必担心——只要你别在火焰附近混入氧气，它就不会着火。另一种得以游览土星天空的选择是真空飞艇。毕竟，唯一比氢气还轻的东西就是真空。不幸的是，真空飞艇很容易发生内爆。

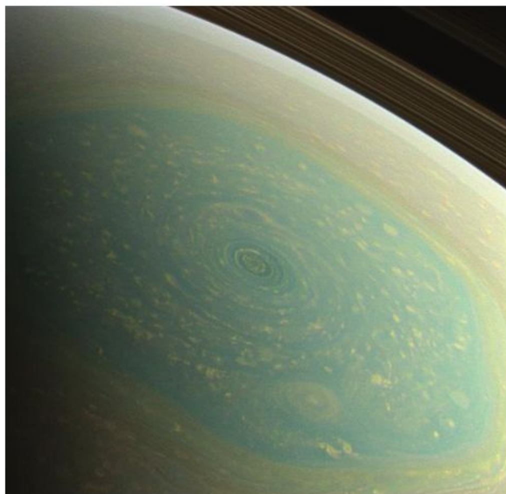
从轨道上看去，土星令人惊叹。虽然大气层较轻，这颗星球还是非常庞大的。逃离土星的引力，要比你在13亿千米之外逃离地球的引力时多耗费3倍的火箭燃料。你需要乘坐航天飞机去拜访土星周围的卫星，在其中的大部分星球上乘坐漫游车游览。最大的卫星土卫六上有着浓密的氮基大气，那里是使用小型飞艇和飞机的理想场所。



有何好看| WHAT TO SEE

[北极六边形]

在土星的北极，你会看到它最迷人、最神秘的特征之一：六边形旋涡。这个气体旋涡又被称为北极涡流，它略呈圆形，但有着非常明显的6条边。它的直径相当于地球的2.5倍以上，深约100千米，每条边都比地球宽，是太阳系中最伟大的自然奇观之一。如果你想下落到六边形中，那就需要做好准备，应对异常凶猛且风速超过每小时350千米的湍流。整个六边形大约每10.5个小时旋转一周。这种不寻常的现象到底是怎么形成的？在不同的深度以及表面不同的位置上，土星的风速都是不同的。这些风会产生巨浪，随着6个浪峰在土星的极点周围交叠，巨浪形成了一个六边形。浪峰的数量以及最终的形状取决于不同层次的风速及风速差异。



土星北极地区急如射流的风形成巨浪，浪峰交叠形成六边形。

美国国家航空航天局/喷气推进实验室/美国空间科学研究所

[南方飓风]

土星的南极没有六边形，但那里有着永不休止的飓风，看起来就像一只不眨一下的巨眼。那里的风很危险，速度高达每小时560千米——比地球上的飓风还要快。爱冒险的旅行者可能会想要深入巨眼深处。那里是除了六边形外，少数几个可以深入大气而不会被云层吞没的地方之一。

有何好玩| ACTIVITIES

[光环游]

许多人都曾通过望远镜瞥见土星雄伟的光环，但是很少有人踏上13亿千米的旅程去触摸它们。体验土星环是许多心怀大志的太空游客的毕生梦想，有些人甚至会花数周时间细细琢磨那些复杂的图案。

土星有七个主环，每一个都由数十万个更窄的环组成，后者被称为小环。它们是灰色的，带有一丝粉红色和棕色的光泽，每一个都以一个英语字母为名。光环从距离土星7000千米处延伸到80000千米处。土星云顶和光环内边缘之间的距离，是土星宽度的一半。

离土星最近的光环是D环，接下来依次是C环和最大也最亮的B环。这三个内环被名为卡西尼环缝的著名大缺口与其他环分开。与大众的认知相反，卡西尼环缝并不完全是空的，而是含有少量的灰尘。

卡西尼环缝以外的下一个环是A环，那里有个较窄的恩克环缝。接下来是F环。最外面是纤细的G环和E环。

土星的光环非常薄，只有约10米厚，因此最好的观赏角度是从上面或者下面看，而不是从侧面看，否则它们看上去就只有薄薄的一片了。随着你不断接近，你会发现构成光环的微粒并没有你想象中那么井然有序。它们聚集成团，团在运动方向上拉长，形成不规则的曲线，团之间隔着很大的空间。如果你能把各个光环中所含的物质全部收集起来，你就可以为土星缔造一颗中等大小的全新卫星。

光环不是静止的，它会收缩、膨胀，仿佛有生命一般。土星的卫星影响着光环的运动，与它们优雅地嬉戏，让它们在引力的作用下荡漾舞动。光环会向外延展，会变厚，会在边缘形成参差如山的形状。黑暗的辐条图案横贯光环，时而出现，时而消失。这些光环是由卫星和运行至此的彗星所喷出的冰维持的，光环吸纳的物质比流失的物质少，或许，经过漫长的岁月后，它们会完全消失。

没有人确切知道土星光环的起源，不过最合理的理论认为，它们是由一颗过于接近土星的卫星形成的，近侧和远侧所受的引力差异导致这颗卫星被拉伸，直至彻底被潮汐力撕碎。

在石块上品尝一杯太空鸡尾酒吧，冰块直接从光环里取就可以了——因为其中93%的成分是水冰。一定要确保你的酒保使用的冰没有被沙砾、盐或者毒性物质污染。

[寻找极光]

拜访土星的两极时，要留意极光。和木星一样，土星的磁场会捕获来自太阳、卫星以及自身的带电粒子，并将它们扫入磁极。高能粒子撞击土星大气层顶部的气体时，会把能量传递给原子和分子，然后这些能

量又以光的形式被释放出来。土星的磁场没有它的邻居木星强，但它的极光同样绚烂。有如巨大的幕帘一般，极光摇曳在土星的高层大气中，高度可达100千米。极光的颜色会随着高度变化，底部是粉红色的，越高便越呈现出可爱的紫色。

[追逐风暴]

土星翻腾的大气层看起来像是一碗经过了充分搅拌的带有巧克力酱的咖啡冰激凌。每过几十年，就会有一场几乎席卷整颗星球的巨大风暴，令满太阳系追逐风暴的人们喜笑颜开。这些巨大的白斑是一种罕见现象，在过去140个地球年里只出现过6次，或者说每一个土星北半球的夏天里出现大约1次。它们的面积比整个美国还要大，是由大气中上升和下沉的水蒸气形成的。这和地球上风暴形成的基本原理差不多，只不过土星风暴形成所需的时间更长。

[跳伞]

土星的质量和尺寸都比地球大，这为跳伞运动提供了独特的条件。选择一家信誉良好的公司很重要，而且最重要的一条，是要预订那些等你安全降落后才接受付款的公司。声名狼藉的运营商会让跳伞者在过高的位置起跳，那样他们的加速度会很大，等到这些不幸的冒险者到达气体密度更大的高度时，就会因为过高的坠落速度而像流星一样燃烧起来。不过不要因此被吓到。只要你在大气层中开始，阻力就不会让你加速到致命的速度。从压力与地球相同的地方起跳，站在飞艇敞开的门口准备跃下时，你会觉得自己轻了几千克。一旦你迈出这一步，你的加速度只会比在地球上略小一点。地球上的终极速度是每小时195千米，达到这个速度之后，你就要减速了，但是土星的大气密度较低，阻力较小，你在土星上要冲到每小时500千米才会达到受力平衡。你可以享受比最快的赛车还快的速度所带来的快乐，而且你和天空之间只隔着一套宇航服。

你将在一层纤薄的黄色氨冰云中开始坠落。大约10分钟后，你会跌落100千米，遇到更厚、更红的硫氨冰云。最后，你会到达一些更加眼熟的白色水汽云。整个坠落过程将非常黑暗——云顶上接收到的阳光只有地球上的1%，随着你在大气层中越坠越深，光线还会变得更暗。最终天空会变成漆黑一片。向着黑暗的深渊尽情坠落吧。你没有坠地的危险，因为根本无地可坠，但是你的宇航服确实有可能在过深的位置因为压力而内爆。你也许会厌倦黑暗中的坠落，如果有了这种想法，你可以启动降落伞，发射上升火箭与你的回收船会合。

如果继续跌落到你能生还的位置以下，你会进入土星上最神秘的区域，一个在高压高温泥浆中能凝结出固体钻石的地方。那些粗糙钻石的直径或可超过2.5厘米，形成钻石雨纷纷落下。虽然所有由气体和冰构成的巨行星内部都蕴藏着钻石，土星上这种迷人的降雨规模却是最大的。

[观看焰火]

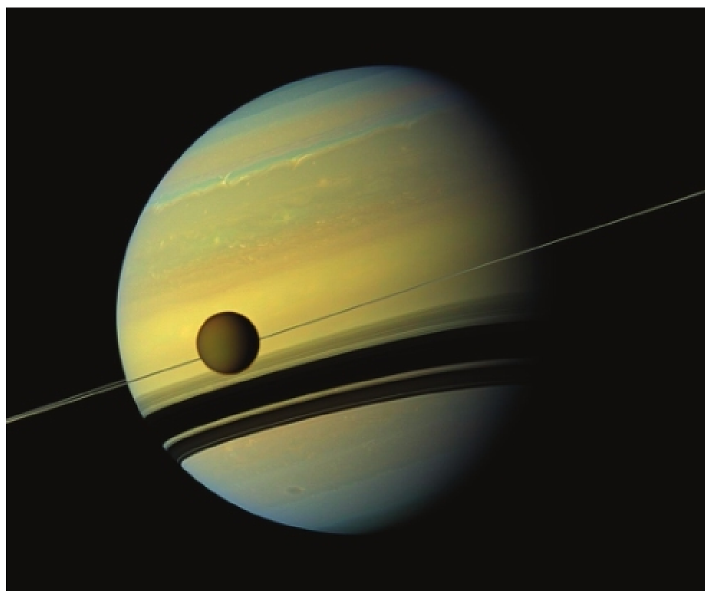
土星大气中约96%的成分是氢气，如果有氧气存在，就会非常容易发生爆炸。虽然浪费宝贵的氧气是不可取的行为，而且定居点和宇宙飞船内的明火非常危险，但是在一些特殊场合，人们可以从大气中收集氢气，然后在人工空气环境中点燃，制造受控的爆炸。点燃气体所产生的炽热烟柱看起来就像朵迷你蘑菇云。

附近有什么| WHAT'S NEARBY

何必只满足于一颗卫星？土星有62颗卫星，能够为不同的卫星游历者提供多种多样的乐趣。不过，如果你的时间只够参观一颗卫星，那就去土卫六吧。

[土卫六]

如果你想在地球以外的某个海滨度假，土卫六是你最好的选择。注意，探访土卫六更像是去南极探险，而不是在阳光明媚的坎昆[16]逍遥一番。你需要适应这里的海滩，因为它们笼罩在永恒的黄昏之中。这里的正午感觉就像是日落之后的15分钟，太阳躲在难以穿透的雾霭背后。如果你能忽视这一点，这颗橙色卫星上的岩石海滩还是相当可爱的。



土卫六是太阳系中最有意思的地方之一。

美国国家航空航天局 / 喷气推进实验室 / 美国空间科学研究所

你需要配备防护措施，抵御空气中的有毒成分和相当于地球北极的

低温，不过加压服可以丢掉了，因为这里的大气压力仅为地球海平面的1.5倍。当你的衣服紧贴在皮肤上时，你能感觉到气压的推挤，那种感觉就和你潜在泳池底部时的感觉类似。

在由碳氢化合物构成的湖泊和河流中跋涉会十分有趣。因为碳氢化合物比水重，你穿着保暖服就可以浮在黏稠的液体上。可以试试像海豚一样跳出液面。如果你安静而有耐心，就有可能从大体平静的海面上听到海浪撞击的声音。由于被异星的大气和低温扭曲，这种声音听起来低沉又陌生。海浪袭来的速度比在地球上慢，这是因为液体和空气都比较浓稠，而且风速也很慢。

在海滩上消磨时间的时候，你可能会注意到这里十分流行飞盘游戏。土卫六的大气层格外适合投掷圆盘，不过，经验再丰富的超级玩家也必须花点时间来调整自己的战术。超致密的大气导致了很大的升力、缓慢的降落速度和很大的空气阻力，你需要强有力的臂膀才能完成投掷。

除了海滩游客，大量的甲烷和乙烷湖还吸引了成群结队的泛舟者欣赏岸边美景和空中的薄雾。初次来到这里的人可能会惊讶于湖泊和河流上的小船有多低，而这些，都是因为甲烷的低密度。在低黏度的海洋中航行很容易。克拉肯海是热门的泛舟地，它是土卫六上最大的“烃”体，比地球上的里海略大，某些位置深达160米。

冲浪者也会聚集在这颗卫星上，因为土卫六以奇涛怪浪闻名。别误会，土卫六在冬天时风平浪静，波浪通常很小，只有几厘米高，移动速度很慢，大约为每小时2.5千米。如果你有幸赶上罕见的巨浪，那么在土卫六上冲浪会成为超凡脱俗的体验。当飓风在极地海洋上出现时，你会发现很好的拍岸浪。

风暴会带来甲烷骤雨，巨大的雨滴几乎是地球上雨滴的两倍大。由于浓厚的大气和低重力，土卫六上的雨下落得很慢，就像地球上的雪花一样。在风暴中，你可能会看到闪电，听到异星的雷声。

在土卫六的海滩上玩够了以后，你可以去赤道的沙丘。那里的沙子像麦片一样均匀，像沥青一样漆黑，有一种朴素的美。你可以乘坐漫游车探索它们，遇到陡峭的斜坡时，便停下来徒步上去。如果有机会，你可以尝试从空中俯瞰沙丘——它们在赤道上环绕土卫六一周。

探索这颗卫星的最佳方式之一是靠自己的力量飞行。像粥一样稠密的大气和低重力意味着穿上一套带翅膀的衣服，手臂上装上襟翼，也许再加上一个小小的推进器，你就能像鸟儿一样在空中飞翔。不过，因为重力很低，在厚厚的空气中挥舞滑翔机一样的翅膀会很困难。你的面板上可能会有汽油露珠凝结。要想升空，你得尽可能快地奔跑，然后启动助力推进器，跳跃起来，令双脚腾空。一旦离开了地面，你就需要尽力拍打翅膀，升上天空。当地面差不多消失在你下方浓浓的橙黄色雾霭中

时，尝试俯冲下去，在某个甲烷湖表面掠过。

如果喜欢历史，你可以在南半球一个叫作“上都”的明亮地区参观惠更斯号探测器的残骸。它是首个在太阳系外围着陆的探测器，拍摄了首批土卫六表面的照片，展现了一片荒凉的多石地貌。

[土卫十八]

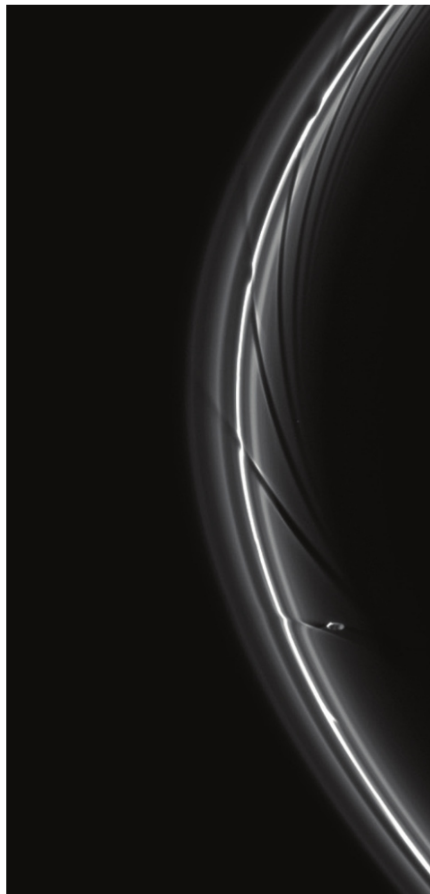
你可以在最靠近土星的卫星——核桃形状的土卫十八——表面近距离观察土星光环。土卫十八收集了原本会绕着土星构成一条光环的粒子，留下了恩克环缝。它在西方的名字源自希腊神话中牧羊的潘神，在现实中，这位“潘神”会利用重力，将光环粒子作为自己的羊群。

[土卫十七]

土卫十七明亮而冰冷。它的表面上到处都是空洞，我们建议你找一个不错的空洞，然后守在里面。这样你就可以在公转轨道上观察土星了。因为土卫十七的自转速度等于公转速度，你在环绕土星的过程中可以一直饱览土星的美丽景色。

[土卫十六]

这颗冰天雪地的卫星形似土豆，长135千米。土卫十六或许很小，但它雕琢、塑造着近旁的F环。有人认为F环是土星最奇怪的光环。土卫十六的引力会在光环上产生持久的涟漪、断裂和扭结。你可以在这颗卫星上，抵近观赏F环复杂而迷人的动态。



土卫十六的引力在土星环中荡起涟漪。

卡西尼成像团队 / 斯坦福空间计划 / 喷气推进实验室 / 欧洲航天局 / 美国国家航空航天局

[土卫三十五]

土卫三十五运行在A环中的基勒环缝内，清理着那里的微粒。它是在土星光环主体内运行的两颗卫星之一（另一颗是土卫十八）。身在土卫三十五上，你能欣赏到光环无与伦比的景观，构成其复杂波纹图案的冰粒、卵石和微小颗粒都会清晰可见。你还会在环缝边缘看到1000多米高的波浪，以及它们投在光环上的长长阴影。

[土卫一]

《星球大战》的忠实粉丝也许会愿意只为了看一眼土卫一而远赴13亿千米之外的土星。这颗直径为200千米的卫星看起来很像死星[17]，一颗巨大的小行星在其侧面留下了巨大的创口，形成了赫歇尔撞击坑。这

一次撞击差点摧毁了土卫一，这个140千米宽的疤痕，让土卫一看上去恶狠狠的。



宏伟的赫歇尔撞击坑让土卫一看上去就像《星球大战》中的死星。

——

美国国家航空航天局/喷气推进实验室/美国空间科学研究所

尽管土卫一的轨道与卡西尼环缝相隔很远，土卫一却与后者的形成有关。卡西尼环缝边缘的粒子公转所花的时间恰好是在更远轨道上运行的土卫一的两倍。这意味着颗粒倾向于定期排列，每次排列成行时，它们都会受到额外的引力。随着时间的推移，这些额外的引力将光环粒子移出卡西尼环缝，留下了一个缺口。

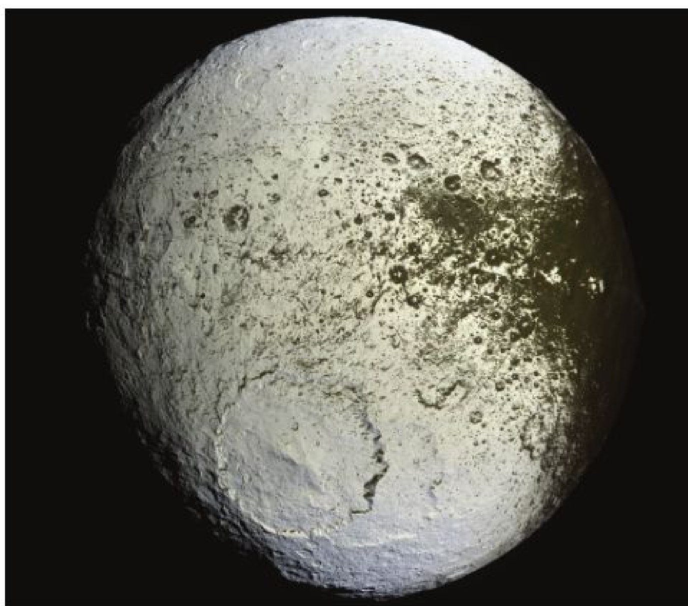
[土卫二]

熠熠生辉的土卫二是土星卫星系统中的冰王。它只有500千米宽，体积相当于月球的七分之一，但它有着多种多样的地貌，包括巨大的裂缝和密集的撞击坑。虽然游客不得不与崎岖不平的地形做斗争，这颗卫星的景色却会让你和你的相机开心。

因为反射了太多的光，土卫二上格外冷，不过，它也并没有被冻成冰疙瘩。在潮汐加热——土星不均匀重力的挤压和拉伸效应——的作用下，土卫二的内部是温暖的，热量在其厚厚的冰层下维持着一层液态海洋。

由于这颗卫星的拉伸和压缩，你可以在它脆性的冰层上参观被称为“虎纹”的巨大裂缝。每条纹路都是一条深沟，约130千米长、1000多米宽、500多米深。它们在土卫二的南极附近很常见，你可以徒步游览，从最东边的亚历山大深沟开始，经过开罗深沟、巴格达深沟，最终到达大马士革深沟。条纹周围的区域虽然也很冷，但还是比其他地方暖和一些，而且那里密布着土卫二上最吸引人的壮丽景观——间歇泉。

土卫二上的间歇泉，以及它们所产生的羽流，是太阳系中的又一大自然奇观。一百多眼间歇泉排布在表面的裂缝旁边，时常喷发。站在间歇泉附近，你会看到一股液柱直直地冲向高空。喷流在你的头顶高高耸立，上升可达数百千米，水流喷出的速度达到了惊人的每小时1000多千米。水和蒸汽很快就会结冰，你会被一场轻柔而闪烁的冰晶雨覆盖。因为没有大气干扰，富盐晶体落下时会变成巨大的伞状，就和木卫一上的火山喷出的岩浆一样。这些淡水冰从土卫二上发射出去，不断为土星最外层的E环提供闪闪发光的冰粒子。



土卫八的这个侧面看起来像被泼了颜料。

——

卡西尼成像团队／斯坦福空间计划／喷气推进实验室／欧洲航天局／美国国家航空航天局

看过间歇泉之后，留意一下雪人撞击坑——这3个巨大的撞击坑排成一列，看起来就像个雪人。这些撞击坑里满是细细的裂缝，就和这颗卫星上的大部分地区一样。

[土卫七]

这颗形状不规则的卫星表面布满了洞和撞击坑，看起来就像一块海绵。你永远也不会知道接下来看到的是表面上的哪一个部分，因为这颗卫星在其21日的公转周期中会以不可预测的方式翻滚。走路的时候要小心不要掉进深坑，否则你很可能会迷失在冰冷的地下洞穴迷宫中。

[土卫八]

土卫八是土星的第三大卫星，这个冰天雪地的世界看起来好像有人在其一侧扔下了一大罐黑漆。它朝向前方的半球呈棕黑色，边缘参差，后半球则是明亮的。土卫八上有一条高高的山脊，沿着赤道环绕四分之三圈。山脊上的山脉高出周围20千米，高度超过珠穆朗玛峰的2倍。这颗卫星上的重力不到地球上的四分之一，因此陡峭的山坡也比较容易攀登。站在山坡上，你会目瞪口呆，尤其是当你能够从有利位置上看到土星的时候。土卫八是最适合观赏光环的卫星，因为只有它的视野不受遮挡，土星看起来相当于月球在地球天空中大小的4倍。

目的地：天王星

DESTINATION-URANUS

天王星是太阳系中的秘密珠宝。这是一颗以奇异的磁场、史诗般漫长的季节、行迹飘忽的内卫星，以及最显著的倾倒自转轴而著称的行星。与地球和太阳系中所有其他行星相比，它是躺着的，自转轴倾角达98度。你几乎不会注意到这种奇怪的现象，因为重力使你稳固停靠在它的气态天空中，而北方仍然被定义为这个翻倒的顶端。没有人知道天王星躺着遨游太空的确切原因，不过很有可能是因为在太阳系的形成阶段，一个地球大小的太空游侠曾与它发生了野蛮的碰撞。

等你见识了这个独一无二的度假目的地后，你踏上漫长天王星之旅所需的勇气便会得到回报。一旦到达，你就会发现许多让你开心的事物。在压力和重力会令你想到家乡的高度上，在它的某座空中城市里，你将沐浴在这个冰冷巨人气态甲烷天空的蓝绿色光芒中。

游客们也喜欢它的卫星——它们拥有的裂缝和峡谷足以让美国大峡谷相形见绌。那些气势宏伟的主卫星在西方被赋予了莎士比亚和18世纪英国伟大诗人亚历山大·蒲柏（Alexander Pope）笔下人物的名字——乌姆柏里厄尔（Umbriel，天卫二）、米兰达（Miranda，天卫五）、艾瑞尔（Ariel，天卫一）、泰坦妮亚（Titania，天卫三）和奥伯龙（Oberon，天卫四）[18]，它们成串的环形山和壕沟中隐藏着许多乐趣。

速览

AT A GLANCE

直径：地球的4倍

质量：地球的14.5倍

颜色：淡蓝色

绕太阳运行速度：每小时2.4万千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的53.2千克重力

空气成分：浓厚，83%的氢气、15%的氦气、2%的甲烷

构成：气体（以硅酸盐和铁镍合金为凝结核，中间为水冰、氨冰和甲烷冰，外有气体氢/氦覆层的冰粒）

光环：有

卫星：27颗

一巴高度处的温度：零下197摄氏度

一日长度：17小时14分钟

一年长度：84个地球年

与太阳的平均距离：29亿千米

与地球的距离：26亿～32亿千米

旅行时间：9地球年可飞越

向地球发送信号的时间：152～168分钟

季节：漫长

天气：美丽的极光和闪电，甲烷霾覆盖着云层中的风暴

日照：永恒的海上薄暮

独特景观：翻倒之姿

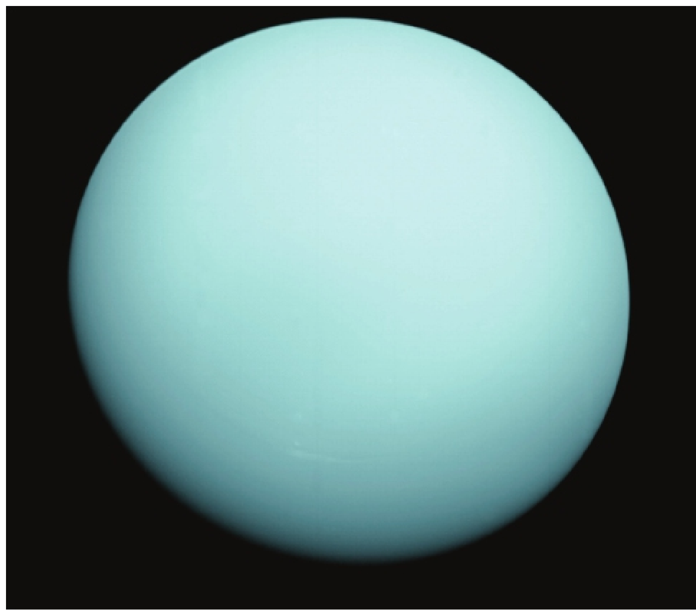
适宜：卫星体育、蹦极

天气和气候| WEATHER AND CLIMATE

不要被那些壮美的蓝色天王星图片愚弄了，这颗星球上的天气是太阳系中最奇怪的。它的每个季节持续21年——给“凛冬将至”这个短语带来了全新的含义——自转轴的极端倾斜也导致了一些奇怪的模式。在它长达84个地球年的一年中，南极有一半时间对着太阳，这意味着该地区的太阳会在天空中盘桓15340个地球日——而当地的一天只有17小时14分钟。在南半球的夏天，天空看起来就像黎明前的湖泊一样平静。当然，即使在夏天，这个湖也会结冰——而且，它并不是真正的湖泊，而是一个由搅动的冰和气体构成的球体，气体中含有氢气、氦气和甲烷。当季节变化时，这里时常出现黑点这种几千千米宽的风暴，而且还会有被太空气象学家称为“明亮伴体”的细小、明亮的白色甲烷云陪伴着它们。

在不同的季节，天气在平静的寒冷和狂暴的寒冷之间摇摆不定。如果你喜欢老式的极地寒流，你会发现天王星的温度非常适合。它距离太阳差不多有30亿千米，在太阳系内保持着最冷大气层的纪录——有时甚至比海王星还要冷。在长达21年的夏季热浪中，你永远看不到温度高过零下184摄氏度，这是地球上南极东方站记录到的最低温的2倍多。在天王星，太阳的亮度只有地球上的四百分之一，没有什么东西能够温暖你。

别忘了带上你的风衣。这里的强风是常态，最高风速可达每小时900千米。跟美国一般大小的风暴时常爆发，其携带的力量是地球上5级风的2倍。云层中电闪雷鸣，太阳活动旺盛的时期会有极光出现。



肉眼看去，天王星就是一颗纯净的蓝色球体。

美国国家航空航天局／喷气推进实验室 - 加州理工学院

何日启程| WHEN TO GO

天王星上的一年太长了，严格来说，你可以在天王星游历许多个地球年，但只看到几个天王星月的流逝。旅游旺季每42个地球年出现一次，在至日期间，天王星的一个极点面对太阳，另一个极点则完全隐没在阴影中。想象一下你在中年时看到人生最后一次日落该是怎样的感受。随着至日临近，背对着太阳的天空就是这个样子。

如果你更喜欢体验长达数十年的仲夏日光，可以计划一下，在春分之后不久到达向日极点，这样一来，你就会有足够的时间准备在2028年左右庆祝天王星的至日。那时候，只在赤道附近才会有日和夜的区分。由于天王星的快速自转，那里的白天就像地球极圈附近的冬日白昼一样短暂，不过说实话，当你距离太阳30亿千米的时候，白天和黑夜也没有多大区别。

如果你想节省燃料，最好在可以利用土星或者木星引力助推的时候前往天王星。不要忘了给每条路径留出大约10年的旅行时间。风暴追逐者应该计划在2049年到达，那时会有大量的风暴活动。

漫漫长路| GETTING THERE

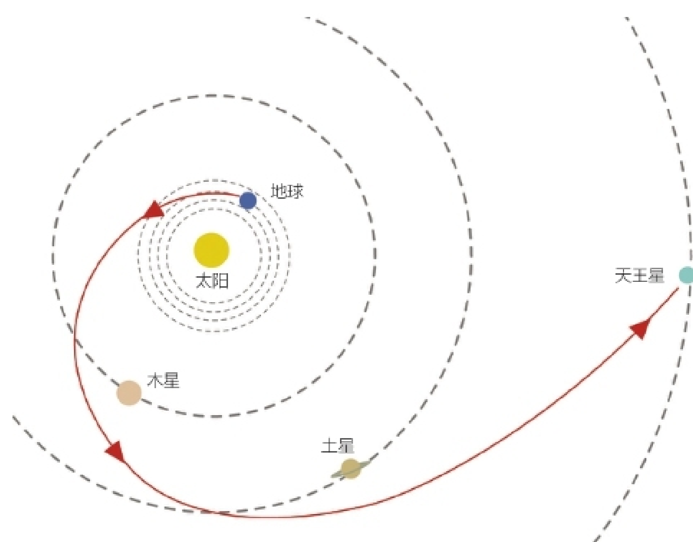
如果计划得恰到好处，你就可以在不到10年的时间里完成30亿千米

的天王星之旅。考虑一下你打算休假多长时间，是否可以在途中工作或者继续接受教育，以及是否还打算回来。

核弹驱动的火箭将是你的最快选择，而且它提供了返程的可能性。如果你想在老得不能回家之前有机会在地球上看到你所爱的人，这种风险还是值得一冒的。

对于那些感觉长途旅行很无聊的人来说，低温保存是一个方便的选择。低温保存组织且不会造成损伤的玻璃化程序，已经被成功地应用于器官移植手术，尽管全身恢复……还不好说。这项技术还没有完善，所以对那些声称可以保证复原的公司要留个心眼。留意宣传材料上的小字，因为复原的保证搞不好要等50～100年才能生效。如果他们确实能做到，你就可以在不缩短寿命（太多）的情况下踏上征程了。你可以选择志愿参加某个研究项目以换取太空旅行费用，选择最适合你的方案。

在前往太阳系边缘的旅途中，你可以考虑冬眠。



对于那些希望在旅途中保持清醒和活跃的人来说，你的飞船将提供与游轮类似的便利设施，只是个人空间要小得多。你能够掌握来自地球的新闻，追剧追到最新一集。不过要记住，在远离地球的过程中，你必须应对越来越长的通信延迟。

到达之后| WHEN YOU ARRIVE

终于，你到达天王星了！不管你已经在复古风格的原子火箭上老了10岁，还是通过玻璃化过程沉睡到了未来，此时此刻你都应该庆祝——并且设定你的时钟。虽然天王星上的一昼夜只有17小时15分钟，游客还是应该继续使用地球时间，这是因为，嗯……你是否知道晚上身在平静

的大海中是什么感觉？就是那种地平线消失不见，物体轮廓仅隐约可辨的时刻。天王星上最亮的时候不过如此。最亮的时候。你可以称之为永恒的海上薄暮。不用担心，你可以在遍布全球的各种晒黑沙龙和日光浴室里获得日常所需剂量的维生素D。它们就像地球上的星巴克一样，无处不在。

从远处看，天王星就像一枚毫无特色的蓝色巨球。只有非常接近时，你才能看出这颗星球是一片无边无际的蓝色浓雾汪洋，轻轻起伏着伸向四面八方，直至地平线。

一旦你到了天王星，接收一条来自家里亲朋好友的消息需要3个小时（确切地说是2.39小时到2.93小时之间）。在天王星上发了朋友圈可别指望有人很快点赞。

何以代步| GETTING AROUND

在轨道上欣赏完天王星之后，你便可以坠入它疾风呼啸的天空，近距离观察淡蓝色的云。这里没有坚实的土地，你必须待在空中城市里。

如果你想悠闲地飞越由氦气和氢气构成的大气层，可以选择飞艇。要想更快地旅行，你可以乘坐飞机。赤道上空的主射流向西流动，与行星的自转方向相反。

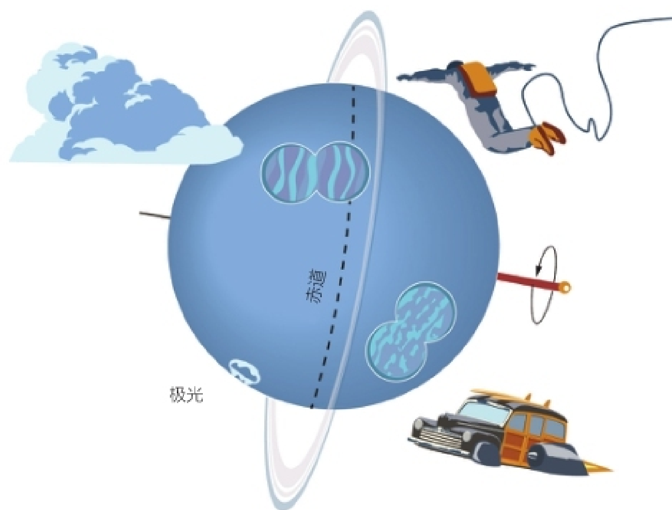
看够了朦胧的天空，你必须从空中发射，回到轨道上。参观天王星各种各样的卫星时，你可以租一辆漫游车或者跳跃机。

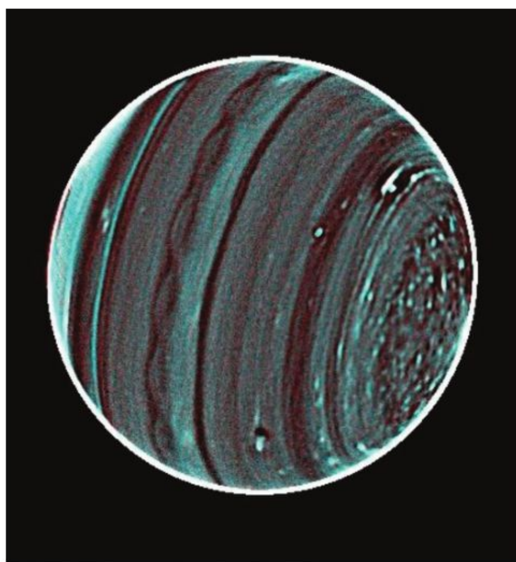
有何好看| WHAT TO SEE

[赤道波]

乍一看，天王星就像美国内布拉斯加州无边无际的玉米田一样平坦无聊，但是如果花点时间仔细观察，你就会发现一些有趣的事请。这颗星球上最奇怪的诱人景观之一，在赤道以南环绕全球的天气现象，只能在红外波段下被观察到。你可以戴上能够接收肉眼看不到的长波光线的特殊护目镜。护目镜会增强光线，让你看到更多细节，就像夜视镜一样。只有这样，你才能看到大气层中那些扇形的波浪，欣赏千回百转的美丽图案。记住，要在安全的距离内观察，否则再往前，你就要把飞船开进是非之地了。

在这颗令人昏昏欲睡的蓝色球体上，还有许多可做的事情和可看的景色。



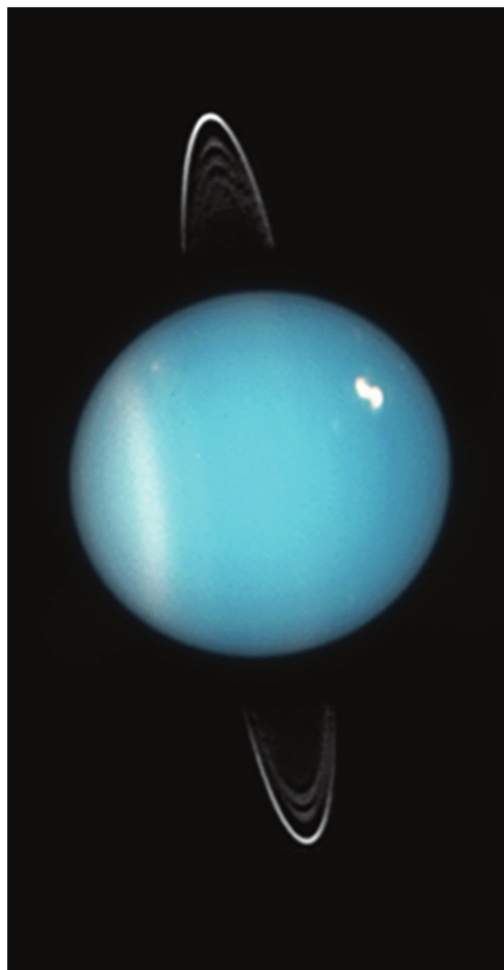


红外波段的图像显示，天王星平静的外表下隐藏着波涛和斑块。

美国国家航空航天局 / 欧洲航天局 / 劳伦斯 · 思若莫夫斯基（L. A. Sromovsky）/ 帕特里克 · 弗赖伊（P. M. Fry）/ 海蒂 · 哈梅尔（H. B. Hammel）/ 伊姆科 · 帕特（I. de Pater）/ 凯西 · 瑞吉斯（K. A. Rages）

[狂乱的北极]

在赤道附近饱览过热带波涛之后，你可以转向北边，经过暴风骤雨的危险区域，到达旋转的北极点。就跟木星和土星的北极差不多，这个区域里到处都是旋涡，高高的云团和大气空洞混合在一起，让那里呈现出可爱的斑点外观，也会让你拥有一次狂野的旅行。就像在所有行星上一样，你需要时刻留意天气预报。哪怕已经存在了许多年的风暴也会突然消散，而新的风暴可能会随时出现。



美国国家航空航天局 / 欧洲航天局 / 马克 · 肖沃尔特（M. Showalter）

[光环]

天王星有13条光环，构成它们轨道的物体的大小，从沙粒到小沙发

不等。光环影影绰绰，比木炭还黑。你可以随着石块一起飘荡，一边欣赏下面的甲烷雾霭，一边享受共享轨道上的那份宁静与孤独——你现在是光环的一部分了。

[钻石湖]

珍贵的宝石像冰山一样漂浮在液面上，还有什么比这样的液态钻石湖更吸引人呢？人们认为，每一颗气体行星内部都有这样一个神奇的所在。然而，不要屈服于那些奢华湖泊的诱惑，你一定会在徒劳的接近尝试中灭亡，被巨大的压力和温度压碎并熔化。

有何好玩| **ACTIVITIES**

[游览“天空威尼斯”]

你是否有过睡在云层里的梦想？天王星上空的悬浮飞艇系在一起，创造了一个城市的建筑奇迹，保证能让你梦想成真。狭长的气球就像威尼斯运河里的平底船，你可以在其中穿行。这些飘浮的城市在每个天王星日，都会随风全球漂流一次，而在两个至日之间，还要跟随着微弱的阳光从一个极点迁移到另一个极点。巡航高度的气压与地球海平面相当。因为一颗行星所产生的类似地球的天然重力引发了乡愁？身在天王星的甲烷云层中，你的感受大抵如此。

不是所有的事情都会让你想起家乡。像它的近亲土星和木星一样，天王星寒冷的上层大气由氢气构成，其中混合着氦气和甲烷。大气中的气体吸收了所有的红光，使得天王星呈现出标志性的蓝色。下层大气则展现出这颗行星流动的一面，那里有水、氨和甲烷的冰冷混合物。

氢氧混合物容易爆炸，因此充满氢气的大气会造成一定的安全风险，但它提供了燃料来源，可以让你飞出天王星大气层，或进行卫星支线游。

你可以通过不同的方式享受身处高空城市的乐趣，比如在穿戴停当后沿着某个著名的广场来一次浪漫的散步，凝视天王星令人陶醉的蓝色景观。晚上散步时不需要带加压套装，穿着保暖套装，戴上呼吸包，就可以看风景了。你可以留意下面云层间的闪电，在太阳照到极点附近时，你还会沐浴在由那里的紫外能量产生的、名为电子辉光的迷人极光里。

[在氦氧吧里放松身心]

充足的氦气保障了整个浮空城市里充满活力的夜生活。就像地球上的氧吧一样，顾客可以从不同口味的氦氧混合物中进行选择。一天的气球之旅结束后，你可以靠吸入氦气度过一个傻笑不已的夜晚，这是一种

非常有趣的放松方式。每晚的高音卡拉OK比赛很快就会爆满，竞争也会十分激烈。大多数氦氧吧都有纯正的氧气供你选择。

[飞艇旅行]

想探索天王星朦胧大气层的奥秘吗？乘坐着飞艇，迷失在浅蓝色的迷雾中吧。这些能够在这颗行星奇怪的大气层中飞行的载具经过了特别设计，看起来就像潜水艇和热气球的结合。大多数空中城市都有港口，那里挤满了想和你做生意的当地导游。你可以待在自己的私人舱室里来个内层大气一日游，或者参加某个团体游，近距离观赏天空。

宁静而永恒的蓝色星球会在你下降的过程中展现出惊人的细节。起初，你感觉像是被蓝天包围。蓝色的形成一方面与同样造成了地球蓝天的散射有关，另一方面是因为甲烷阻挡了红光。你可能会发现自己为地球而生的头脑在跟你开玩笑，让你认为下面有一片朦胧但坚实的土地。只有当你终于冲破浓厚的臭气，上方的光线暗淡下来时，你才会意识到下面确实没有坚实的地面。最终，漫漫无垠的蓝色流云之海将分裂成一层白色的甲烷云。闪电过后，你会听到天王星雷鸣的奇异变音，那是声调随温度和空气密度变化的结果。在白色甲烷云之下，你还会穿越更多的云层。黄色氨云之后是红色氢硫化铵云。不用担心，你的加压舱会保护你免受臭鸡蛋味道之苦（希望如此）。在这些臭烘烘的云层之下是你熟悉的白色水冰云。在那个位置上，你的身体下方只有一片更深、更暗、更厚的阴郁海洋。

水、氨气和甲烷构成的高压海洋之下是广阔的液态金属，它的样子就像水银，但实际上是氢。不过，你的飞船肯定到不了那里就已经内爆了。再往下是相当于地球质量10倍的熔岩。即便你的太空舱能承受住天王星深处的极端压力和温度，你也需要回头了，否则便有可能永远困在它的高重力里。

[跃入深渊]

系上缆绳，从遍布全城的众多探险站中选一个跳下去。你最好提前付款，免得等你明白了头朝下跳进虚空意味着什么后会改主意。踏出平台跟走下船板并无太大区别，除了你不是落入冷冻盐水里，而是会掉进迷蒙的烟气当中。当你在权衡是否要退出时，旅行团成员会在急切的等待中盯着你。而一旦你跳下去，时间就会停止，与你同在的，只剩下天空之神。

附近有什么| WHAT'S NEARBY

天王星有20多颗卫星，莎士比亚和亚历山大·蒲柏的书迷肯定会喜欢它们的英文名字。每一颗卫星都有自己独特的魅力，其中最小的卫星的直径只有不到20千米。不管你是打算周末远足还是准备在卫星上玩乐几

个月，总有某颗卫星能够满足你的需求。天王星的卫星是太阳系中某些狂热运动爱好者的家园。你可以找到足够开展溜冰、曲棍球、网球、排球、高尔夫球和攀岩等运动的卫星级设施。

考虑一下周末去内卫星旅行，比如去天卫六、天卫七或者天卫二十六。在那里，你可以近距离观赏天王星的光环系统，而且还有一丝令人振奋的危险。有传言称，天卫十可能会在未来一亿年内与天卫九或者天卫十一相撞。

[天卫三]

天卫三得到了莎士比亚笔下精灵女神的名字，而它在天王星的卫星中也算是个美丽的女王，因为在1亿多千米的范围内，数它的个头和质量最大，而且它拥有太阳系第八大卫星的头衔。

在它坑坑洼洼的表面上，一个热门的旅游景点是梅西纳峡谷（Messina Chasma）。这个长度超过1500千米的峡谷比美国大峡谷长2倍、宽很多倍。你可以乘坐漫游车探索其边缘，在一天的漫长旅行后，找个面向家庭和夫妇的冰旅馆放松一下。蒸个桑拿，恢复精力，再泡一下二氧化碳冰浴。睡觉前，读一读《仲夏夜之梦》中你最喜欢的段落，思索一番，然后，你这个卑微的旅行者，将在书中精灵女神的护佑下入眠。

想找一点刺激？你可能会想从天卫三高得惊人的悬崖上跳下去。有一处悬崖高出周围地面4000多米。在这个一般人体重不会超过5千克的低重力环境中玩玩蹦极吧，那肯定会是一次难忘的跳跃。尽管专家认为天卫三表面蓬松，你还是要确保绳子安全可靠，因为即使在低重力环境下，如果跌落的时间足够长，你仍然会达到足以伤害自己的速度。在天卫三上坠落4千米之后，你将以每小时16千米的速度落地。

一定不要错过北端，那里有这颗卫星上最具辨识度的环形山。以哈姆雷特母亲的名字命名的格特鲁德环形山宽300千米。附近的厄休拉大约是它的一半大，西边的卡尔弗尼亚拥有奇怪的椭圆形峰。注意到命名趋势了吗？它们都是莎士比亚戏剧中女性角色的名字。[19]这种做法源自天王星发现者威廉·赫歇尔之子约翰·赫歇尔（John Herschel），正是他最早负责为这些卫星命名的。

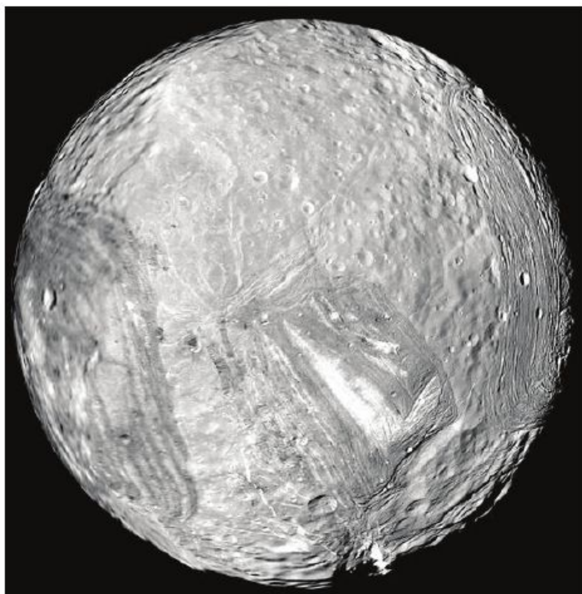
[天卫四]

如果以莎士比亚笔下人物的名字命名的撞击坑让你着迷，那就去天卫四吧。它的英文名来自《仲夏夜之梦》中泰坦妮亚（天卫三）的丈夫仙王奥伯龙（Oberon）。天卫四表面布满了撞击坑，古老的峡谷和撞击坑纵横交错 ，一方面让它显得与众不同，另一方面也暗示了曾经的重大地质活动。撞击坑数量众多，但都很浅，其中最大的是著名的200千米宽的哈姆雷特撞击坑。90千米宽的奥赛罗撞击坑也在那里。天卫四上最

大的莫姆尔峡谷（Mommur Chasma），比天卫三上的梅西纳峡谷短，深度却是它的3倍。

登山者会喜欢东南部一座尚未命名的山峰，它比地球上的珠穆朗玛峰还要高出2000米。你有可能成为第一个爬上去的人，说不定它会以你的名字命名。

和附近的许多其他卫星一样，天卫四表面有大量的水冰（不过没有干冰），夏天温度为零下184摄氏度，冬天可低至彻骨的零下240摄氏度。



有时被称为“蛋头先生”的天卫五表面崎岖不平，仿佛它曾经分崩离析。

美国国家航空航天局／喷气推进实验室－加州理工学院

[天卫五]

你渴望奇异之物吗？去见见天卫五吧。天卫五是一颗矮胖的卫星，灰色，多孔，仿佛曾在遥远的过去被撞得四分五裂，然后又被拼了回去。它是太阳系中最神秘的卫星，对于最专注的研究人员来说，它的表面也是个难解之谜。天卫五上有悬崖、断层、山脊、撞击坑、陡坡和峡谷。它的峡谷有长有短，有一条峡谷旁边的悬崖比珠穆朗玛峰还高。

它最显著的特征是印威内斯冕状物（Inverness corona），这是一种由上涌的冰造成的人字形地貌。埃尔西诺和阿登是另外两个著名的冕状物。天卫五上的重力不到地球上的1%，你的跳跃高度可以达到地球上的100倍。不怕死的人可能会考虑在维罗纳卢比蹦极，那里是一座20千米高的悬崖，是整个太阳系中最高的悬崖！

目的地：海王星

DESTINATION-NEPTUNE

海王星是一颗无垠的蓝色星球。这颗距离太阳45亿千米的冰巨人吸引着那些追求强烈孤独与宁静黑暗的人。它是一个僻静的所在，你不会被成群结队的游客打扰。蓝光荧荧、气滚云翻的海洋里蕴藏着黑暗。你会被海王星引人入胜的云景迷住。与天王星相比，它的体积稍小，密度更大，风力更猛，颜色更蓝，重力与土星相似。它拥有一个奇怪的磁场、14颗卫星和几条纤细的光环。当你穿行在它朦胧的大气层中，或者在附近某颗卫星上欣赏它无边的蓝色时，你会好奇自己为什么没有早点来到这颗太阳系中最壮观、最神秘的行星上。

哪怕这颗盘旋的蓝色宁静球体看起来无害，你也不要被它的颜色给麻痹了。和木星、土星、天王星一样，它是一颗危险风暴肆虐的行星，而且这些风暴拥有太阳系中最快的风速。你说不定会花几天、几周或者几个月的时间，在它令人兴奋的风里扬帆飘游。

速览

AT A GLANCE

直径：地球的3.88倍

质量：地球的17倍

颜色：比天王星更蓝

绕太阳运行速度：每小时1.9万千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的67.6千克重力

空气成分：浓厚，80%的氢气、19%的氦气、1.5%的甲烷、痕量的水和氨

构成：气体

光环：有

卫星：14颗

一巴高度处的温度：零下201摄氏度

一日长度：16小时6分钟

一年长度：163.8个地球年

与太阳的平均距离：45亿千米

与地球的距离：43亿～47亿千米

旅行时间：8.7个地球年可飞越

向地球发送信号的时间：241～258分钟

季节：漫长

天气：多云

日照：比地球上暗淡900倍

独特景观：太阳系的最后一颗行星

适宜：郁郁寡欢

天气和气候| WEATHER AND CLIMATE

海王星寒冷而多风，一如你对太阳系最后一颗行星的想象。在距离太阳45亿千米的地方，零下200摄氏度的温度实属正常。这个冰巨人是由气态氢、氦和甲烷构成的旋涡。甲烷带给它美丽的蓝色面目，这也是它比天王星稍微暖和一点、蓝一点的原因之一。尽管外表寒冷，海王星有着一颗炽热的心。过热的中心和寒冷的外部之间的差异，驱动了海王星上肆虐的风暴。

一般来说，你只能航行在海王星高空浓厚、迟缓的乙烷、氰化氢（因其苦杏仁味而闻名）和甲烷迷雾当中。再往下，温度也会骤降，气态迷雾让位于冰冷的氨和水云。这些云有时会呈现带状，在下面的蓝色深渊投下阴影。

和其他气态巨人一样，要想在海王星深不见底、令人不安的天空中找到自己的方向，你需要参考气压与地球海平面处相同的高度。当你落到这一点以下时，烟气和云层会变成冰冷的“海洋”，不过它和地球上的海洋全无相似之处。构成这片海洋的不是液体，而是未结合氧、氮、碳、氢以及氨和甲烷的化合物。它们的形态介于固体、气体和液体之间，共存于一片混乱空间。如果你下落得足够深，压力会飙升到地球表面的10万倍。落入海王星炽热的地幔后，你会最终抵达它的小核心——一枚由岩石和冰构成的硬球。

这里的季节比围绕太阳运行的任何行星都长。海王星的一年持续将近165个地球年，一个春天便可长达人的半生。海王星的自转轴倾角为28度，得到阳光较多的地区云层会变亮，人们可以由此注意到季节的变化。这里全年都有风，而且风速接近超声速。

当你向北或者向南移动时，一天的长度会有变化，这个所有气态行星都具备的特征在海王星上格外明显。虽然官方公布的一天长度是16.11个小时，但这实际上只是不同纬度上的所有气体旋转一周所需的平均时间。两极在短短12个小时内就可以转一圈，而赤道上的物质则需要将近18个小时。从南纬50度到北纬45度，赤道附近环绕着一条厚厚的中央气体带，它以接近每小时1500千米的速度向东移动。如果你想延长一天的时间，可以选择前往。

在海王星强大却稳定的风中，状如黑斑的风暴会突然出现，破坏海王星的平静氛围。它们是巨大的旋涡，周围有光芒四射的云团陪伴。与木星上的风暴不同，这些风暴的形成和消散更加频繁。

何日启程| WHEN TO GO

考虑到它的偏远、极寒和多风的天气，谈不上有什么拜访海王星的

好时间。不过也没有什么坏时间。例如，如果你想在北半球的夏天去，这个季节会持续大约40年。即使在夏天最热的时候，你也无法逃脱威胁生命的严寒。

虽然在哪个季节前往并不重要，但风暴观察者更喜欢季节变化时的海王星，因为那时形成风暴的可能性更高。海王星下一次北半球春分将在2044年发生，要想赶上，你应该在2030年之前动身。

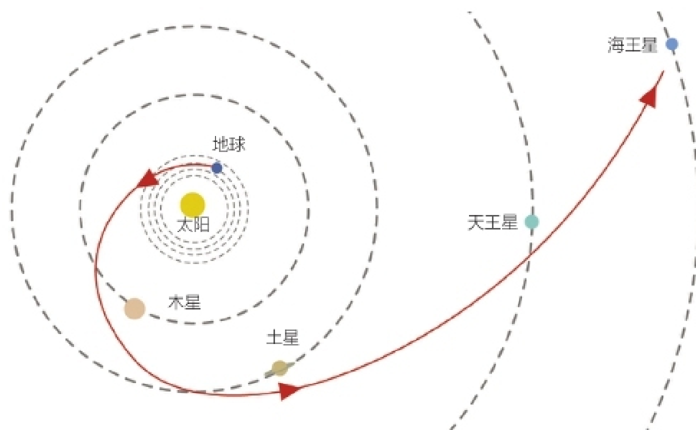
漫漫长路| GETTING THERE

作为太阳系中最后一颗正式的行星（抱歉，冥王星！），海王星是旅费最昂贵的行星之一。它远在天边，以1.9万多千米的时速绕着太阳运转（地球的公转速度是每小时10.7万千米），所以如果你有兴趣放慢速度来个近距离观察，你就必须带上大量燃料。

为了在43亿千米的旅程中节省燃料，你可以从木星获得引力助推。你的旅途中最激动人心、最值得记住的部分就是这些像弹射弹弓一样的动力，你被一颗从附近经过的行星用引力甩了起来。在接下来的几个月里，你将饱览引力助手木星的美丽景色。

你也可以获得其他行星的引力助推——在2020年到2070年间，你能向它们借力的机会只有大约24次。不要等太久才预订机票。你的平均飞行时间将近10年，因此假期套餐包含20年的最低承诺。尽管借助新的，也颇具试验性的离子驱动技术，你或许能在两年内抵达，但最好还是现在就开始规划。

前往太阳系中最偏远的行星需要一定的时间，
但这个目的地对得起漫长的等待。



到达之后| WHEN YOU ARRIVE

靠近海王星的时候，你会看到它纯净的蓝色光华上点缀着熙熙攘攘的深紫色风暴。你要做的第一件事是从轨道上跳下来，近距离观察它们。在海王星的大气层中，你会比在地球上稍重，不过变化很小，经过长时间的微重力旅行后，你可能不会注意到这些。有些人喜欢回到与地球相近的引力环境中，另一些人则觉得这很压抑。无论你在探索海王星的天空时选择乘坐飞机还是飞艇，一定要稳住自己，应对强烈的颠簸。海王星上的风是太阳系中最强劲的。

你很快就会与甲烷亲密接触。正是由于甲烷散射光线的方式，海王星才呈现出深蓝色。这种有害气体约占海王星大气的1.5%。如果过多的甲烷进入你的宇航服或者栖息地，便有可能造成危险的火灾，但是它不会在外面燃烧，因为海王星大气中的氧气太少，无法让火焰维持。

何以代步| GETTING AROUND

你需要一艘足够结实的飞艇来承受海王星创纪录的疾风。在赤道附近，风速会超过每小时1900千米。一旦你在高速行驶，你就不会注意到自己的速度有多快。只有风向改变时，你才会意识到自己在移动。高空的风速较慢。随着你下降或者向两极移动，风速会越来越快。像天王星一样，海王星上也有厚厚的喷射流，横跨赤道的那条向西行进。

海王星上的氦气含量是太阳系所有行星当中最高的19%，其大气的其他部分主要是更轻的氢气。这一点，再加上海王星的引力，决定了这里的大气并不算稠密，因此让飞艇浮在空中是有难度的，除非你选择充满了温暖空气的巨型气罩，或是完全腾空内部空间的真空飞艇。

作为一个替代选项，你也可以乘飞机旅行。只要你有一台不需要氧气就能工作的发动机，你就应该可以停留在空中。

如果你计划去海王星阴暗的深处探险，你需要一艘能够承受高压的结实飞船。最好不要冒险降到压力相当于地球海洋1千米深处的位置以下。继续下潜，你的飞船会变得不稳定。在轻松的假期里，处理一艘内爆的飞船可算不上什么开心事。

等你准备好前往海王星的光环、环弧和卫星时，你需要一艘比你之前从地球发射的飞船强大两倍的火箭飞船。最近的海卫三离海王星只有2.4万千米。海王星最大的卫星海卫一在大约35.5万千米之外，这一距离比地月距离略近。

有何好看| WHAT TO SEE

[大暗斑]

木星上的大红斑吸引了所有的关注，但是海王星也有很多自己的斑

点。发现于1989年的大暗斑撼动了海王星的天空。它膨胀到和地球差不多大——相对于海王星来说，它正如同大红斑之于木星的大小。海王星甲烷层中13000千米宽的深蓝色空隙打开了通向这颗星球更深、更暗处的窗户。在几年的时间里，它搅动着海王星的大气层。与木星上的大红斑不同，它以可预测的模式变形、伸展，以8天为周期收缩并拉长，就像一个呼吸着的巨人。在其他地方都没有发现这种现象。这个大气涡旋与海王星的自转方向相反，以每小时108千米的速度向西飘移，每18个小时完成一次环绕全球的旅程。木星的大红斑相对于周围气体的速度仅为每小时10千米。虽然宽度比大红斑小，但据风暴观察家说，这个风暴的深度可能超过了大红斑。它的边缘有一条长长的卷云，这是它忠实的伙伴。

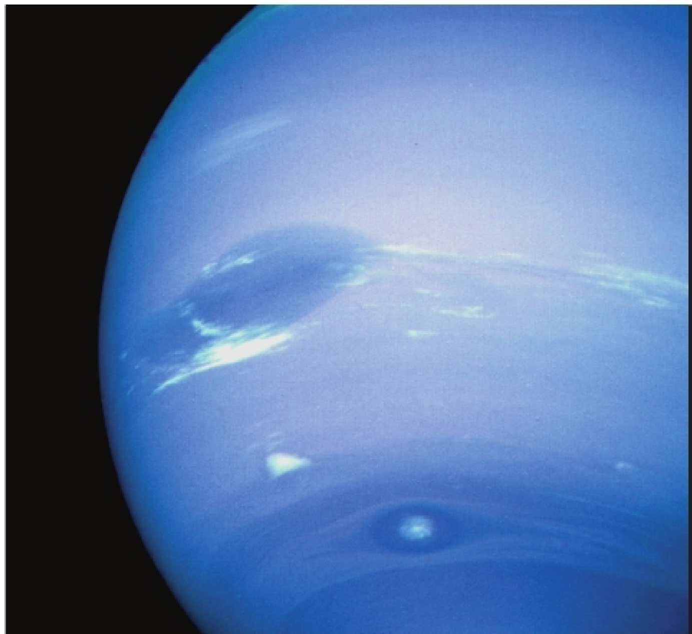
探索海王星蔚蓝色的云、风暴及斑点。



[北方大黑斑]

大暗斑早已消失，但如果幸运的话，你将见识到海王星上的另一个大黑斑。它们来来去去，比木星上的风暴更频繁，每次出现后会持续几年时间。考虑到地球上最长命的飓风只持续了30天，这还是很了不起的。

北方大黑斑虽然比大暗斑稍小，其覆盖面积却相当于美国新墨西哥州。它周围有明亮的小伴云。自从早期的机器人探险家在20世纪80年代传回海王星的图像，人们便追踪过大约十几个巨大的黑斑。最近有报道称有一个像美国那么大的黑斑。你也可以寻找所谓的“踏板车云”，这种白色的小云团在海王星的高层大气中形成，因其移动速度比黑斑还要快而得名。



远远望去，海王星上的风暴十分温和，但其实它们在太阳系中最为猛烈。

旅行者 2 号团队 / 美国国家航空航天局

没有谁能忍着不拿出相机，对着海王星的黑斑大拍特拍。不过要记住，你必须等上8个小时才能知道地球上是否有人给你拍摄的风暴照片点了赞。

[南极特征]

海王星正在从南极泄漏甲烷，就好像吃了太多的豆子。附近有一个类似卷云的活跃弧形云，叫作南极特征。那里比其他地方暖和一点，能够令悬浮在大气中的冰晶变成气体并逃逸。

[神秘的内部]

因为在海王星内部的极端压力下生存非常困难，所以有很多关于它下面隐藏着什么的谣言。在气态的大气层下面，海王星不仅是一个冰巨人，还是一个流体巨人。人们认为它有一层由液态水和氨构成的高压海洋，这倒是应了它名字的由来——罗马海神。

有何好玩| **ACTIVITIES**

[观看海王星的光环和环弧]

假如那些让海王星的光环得以命名的早期天文学家——伽勒（Johann Gottfried Galle）、勒维耶（Urbain Le Verrier）、拉塞尔（William Lassell）、阿拉戈（François Arago）和亚当斯（John Couch Adams）——知道了人类现在可以沐浴在海王星的蓝色光芒中，近距离观察它的环弧和光环，他们会有什么感想呢？这样猜测一下会让你觉得很有意思。海王星的光环是由暗红色的微粒组成的，微粒中含有水冰和大量灰尘。海王星内部的小牧羊犬卫星将它们维持在适当的位置上。还有一条未命名的尘埃环在赤道上空环绕着这颗行星。环弧，也就是不完整的环，在稀疏的光环旁边环绕着海王星。环弧中的巨大间隙是由附近卫星的微小引力造成的。

[游览雾霭和云层]

看向海王星的时候，你会透过它同温层的透明大气望进对流层，那里充满了云层和浓密而缓慢的雾霭。海王星空气中弥漫的甲烷烟雾是非常自然的，尽管和地球上拥挤城市里浓浓的雾霾一样令人不悦。它并不像看起来那么糟。甲烷气体仅占大气的1.5%，这足以使得海王星呈现出蓝色。

赏云者会乐于将海王星上的云层构造与地球天空中的云进行比较。虽然看起来就像地球高空常见的细小卷云，这里的云其实是由成群结队以危险速度行进的甲烷冰晶构成的。状似透镜的荚状云呈现出很多层次，可以供人拍出壮观的照片。

你可以凭借泛蓝的色泽识别甲烷云。它们构成一层薄薄的斑驳，刚好位于一巴高度——压力相当于地球海平面上大气压的高度——之下。下面是浓密的硫化氢和氨云。在大约50巴的高度（相当于潜到地球海洋中接近500米深）处，是由水构成的云。

[搜寻难以捉摸的极光]

想带指南针就带着，但是不要指望用它导航。海王星上的磁场虽然很强，却与地球上的磁场完全不是一回事。它离表面很近，比我们习惯的要复杂。人们认为它受到了行星内部深层金属氢的影响。这里的情况与其他巨型行星相似。在那么高的压力下，氢只能以金属状态而不是分子状态存在。这里的电子自由流动，会对导航造成干扰。

磁场并未根据海王星地理极点的位置分布，而是与自转轴有47度的夹角，正对着太阳。这就相当于地球的北极挪到了纽约、罗马或者北京那么靠南的位置。海王星的磁场也偏离了中心，不像地球一样位于中间。这里的磁场完全不可预测。如果你带着指南针，它会朝着不同的方向瞎指一通，让你感觉自己置身于外星百慕大三角。

由于这些怪异的磁场属性，寻找海王星难以捉摸的暗粉色极光之旅会更加令人兴奋。在磁场扭动、发生转向时，极光也会变化，它们以不

可预知的路径在海王星上游荡，让人很难确定该往哪边找。

[收听闪电]

带上一台便携式收音机，你就可以听到海王星本身的声音了。它在低频波段发射无线电波，频率在6～12千赫之间。信号的强度随着行星的旋转而变化。一天中的某些时间比其他时间更适合收听。

海王星上闪电的强度与地球上差不多。当它来袭时，你也许能够使用非常低频率的无线电接收器捕捉到一声啸叫。那是一种强烈的高音爆鸣，在雷击之后逐渐减弱。闪电平均每小时出现100次，所以经过练习，你应该可以捕捉到一次。

附近有什么| WHAT'S NEARBY

海王星有14颗卫星，其中大多数是岩石碎片，最大的不过2700多千米宽。实际上，其中有半数几乎算不上卫星。它们被称为被捕获物或碰撞碎片，只有几十千米宽，离海王星达上千万千米，绕它运行一周需要好多年。你可以忽略那些遥远的石头。没有人会真的去那里。

你可以靠近海王星，探索它所谓的规则卫星——或者叫内卫星。这些卫星距离海王星仅几万千米，拥有很多值得探索的地貌。在内卫星的有利位置上，你可以饱览海王星暗淡的光环。

[海卫一]

海王星最大的卫星海卫一是一个冬季仙境，上面覆盖着氮气、甲烷和一氧化碳冰，以及一层薄薄的、干净而新鲜的氮和甲烷雪。随着冰的沉降，海卫一上的撞击坑和峡谷都被填平了，这意味着你不必担心任何峭壁、山脉或者深谷。

海卫一是太阳系第七大卫星，直径只有2700千米，比木星的伽利略卫星、土卫六和我们的月球都要小。然而，它是太阳系中唯一一颗公转方向与母星自转方向相反的大卫星，这表明它是一个入侵者，而不是该地区的原住民。大多数现代卫星与它们所环绕的行星都是同时形成的，而海卫一这样的卫星则是被捕获的物体，偶然游荡到了行星附近，它可能是在前往其他地方的途中，被海王星的引力拉了过来。

随着时间的推移，海卫一将把海王星微小的内卫星清除干净。大约35亿年后，整个卫星将被海王星的引力撕裂，形成一个也许比土星著名的光环还要亮的光环。如果你待得足够久，这才是真正值得期待的事情！

如果你现在去海卫一，你会发现它比大多数卫星更亮、反光更强，

也更冷，天气预报经常报出零下数百摄氏度的温度。那里的风并不可怕，它们多半以每小时18千米的速度向西卷去，所以不必担心风寒。天上通常没有云，但是常有薄雾。小冰块在你的脚下嘎吱作响，那里覆盖着一层厚厚的脏冰。大气十分稀薄，其中99%的成分是氮气，此外有痕量的甲烷和一氧化碳。大气层中被称为热层的部分散发着奇异的空气辉光，它是由于紫外线与海王星磁层中的带电粒子相互作用，而后者又与海卫一的高层大气相互作用而形成的。

海卫一的大气虽然稀薄，但也足以让人在表面观察到美丽明亮的流星，幸运的话，你还有可能看到一颗流星一路落到地面。

这颗卫星有大气层，也有自转轴倾角，因此拥有季节和天气。但是它不同于母星，因为自转轴的倾斜方向不同。海卫一上的季节很长，且与海王星的季节明显不同。有时候，它的天气比海王星更极端，有时候却略温和一点。在海卫一上，所谓寒、暑全看个人理解——毕竟，海卫一上某个炎热夏天的平均温度可能是零下233摄氏度。

路途漫漫，有没有想念新鲜水果？去布班贝区吧，在那里，你可以观赏到这颗卫星哈密瓜地形的最佳景致。你可以沿着蜿蜒曲折的深沟游览，它们可能会让你想起土卫二上的虎皮条纹。十几千米宽的凹槽延伸几百千米甚至上千千米，有着仿佛轮椅坡道一般的缓坡。最值得参观的是南部的博因沟和北部的斯利德沟。

布班贝以东是莫纳德区，那里有崎岖不平的凹槽，或者叫壕沟。如果你去过水星，这些地貌在你看来会很眼熟。你可以找一下名为辛和阿库帕拉的奇怪蘑菇地貌。

几百米高的峭壁包围着圣灵和阴曹平原。除了个别凹陷和一两个撞击坑，它们是完全光滑的。如果你在这些平原上行走，要记得穿上你的长筒靴，因为地表很可能已经被冰泥占领了。

南极附近的乌兰加覆盖着粉红色的冰帽。它的边缘颜色更暗、更红，这可能是紫外光与甲烷相互作用的结果。微小的甲烷冰晶体散射了照过来的阳光，这里处于永恒的仲夏时节。虽然天空看起来比地球上的夜晚还要黑，但阳光照耀这个地区已经有100多年了。

海卫一最吸引人的地方之一是它的氮冰间歇泉。地表下30米处有一层液态氮供养着这些间歇泉。这颗卫星虽然冷，压力却足够高，可以让氮气变成液体。当压力降至其通常大气压的十分之一时，氮气会以每小时480多千米的速度通过间歇泉冲出，将物质喷到几千米的高空。在南纬50度，你会看到以祖鲁水精灵的名字命名的喜力间歇泉和以汤加海神命名的马希拉尼间歇泉，它们和另外至少两个活跃的间歇泉聚集在一起。海卫一的南半球上还有100多处间歇泉余迹，大小从几千米到几十千米不等。

[海卫二]

海卫二是海王星的第三大卫星。它奇怪的扁长轨道使得它离海王星最近时只有137万千米，最远时则有960多万千米。这颗冰封的球形卫星每360天绕海王星一周，自转一周只需要不到半天，也就是说它还没有被母星潮汐锁定。

[海卫八]

早期与另一个天体的撞击差点毁掉这颗卫星，并在它表面上留下了一个240千米宽的盆地。这个盆地附近是另一个宽80千米的撞击坑。由于形状不是圆的，与其说它是个标准的卫星，不如说它是个碰撞碎块。海卫八的南半球上还有另一个名为“法洛斯”的大坑，宽260千米，边缘高高突起，比中间的平坦地面高了足足10千米。海卫八本身的宽度刚刚超过400千米，这意味着留下这个大坑的物体几乎摧毁了这颗形状怪异的卫星。

目的地：冥王星

DESTINATION-PLUTO

曾被归为行星的冥王星，是太阳系中最受欢迎也最有争议的太空度假目的地。虽然已经在天体排位中失去了优势地位，但是对于那些渴望着最偏远地方的人来说，冥王星仍然是——并将永远是——那个备受青睐的著名度假胜地。自从1930年被天文学家克莱德·汤博（Clyde Tombaugh）发现以来，这个大冰坨吸引了几代人。它以罗马冥界之神的名字命名，如果说它的名字是地狱的代名词，那么这个地狱似乎已经被冰封了。

可能你和大多数普通人一样，一直梦想着去冥王星旅行，但是和其中很多人一样，你从未去过。它位于遥远而阴森的柯伊伯带，距离地球80亿千米。这块由岩石和冰构成的土地比我们的月球还小，它标志着你已经来到了太阳系的边缘。你会迷恋上它崎岖的粉红色山脉、深蓝色的天空，以及标志性的汤博区——一个呈现出迷人心形的巨大冰雪平原。在长达一个世纪的季节里，水冰和氮冰川在冥王星的表面慢慢漂移。尽管这颗矮行星与太阳相距遥远，这些还是值得一提的。它坑坑洼洼的地形和1000多米高的山脉为探险家提供了丰富的乐趣。这里的重力很小——你的体重不到月球上的一半——你可以像羽毛一样滑过寒冷的土地。

速览

AT A GLANCE

直径：地球的0.2倍

质量：地球的0.2倍

颜色：桃红色、灰色、深绣色

绕太阳运行速度：每小时1.68万千米

引力：一个60千克的人所受的重力相当于地球上的3.8千克重力

空气成分：几乎没有，只有痕量的氮气、甲烷和一氧化碳

构成：70%的岩石、30%的冰

光环：无

卫星：5颗

平均温度：零下223摄氏度

一日长度：153小时

一年长度：248个地球年

与太阳的平均距离：59亿千米

与地球的距离：43亿～75亿千米

旅行时间：89.5地球年可飞越

向地球发送信号的时间：238～418分钟

季节：漫长而严峻

天气：寒冷

日照：非常暗淡，相当于地球上的0.04%～0.1%

独特景观：心形的汤博区

适宜：形单影只、极度深寒

天气和气候| WEATHER AND CLIMATE

哪怕按照外太阳系的标准，冥王星也很冷。不管是冬天、春天、夏天还是秋天，这里的气温始终徘徊在冰冷摄魂的零下220摄氏度到零下240摄氏度之间。从覆盖表面的氮冰和水冰中升华的气体使它变得更冷，就像汗水冷却你的皮肤一样。除非你的宇航服绝缘良好，否则你触摸到的任何东西都会立刻从冰变成气体。急性冻伤，尤其因脚趾向地面散失热量而引起的冻伤，是一个萦绕不去的威胁。

在相当于6个地球日的一天中，冥王星上的天气变化不大，因为它由氮气、甲烷和从冰封表面散发出来的一氧化碳所构成的空气少得几乎可以忽略不计。冥王星上的气压比地球上的气压低10万倍，如果眯着眼睛，你可以看到漆黑的天空中有微亮的线条，那便是大气。你不会被暴风雪困住，也不会感受到狂风，但是你可能会看到一层纤薄的低云。冥王星每248个地球年绕太阳一圈，所以一个季节会持续一个人的大半生。它的轨道是一个扁长的椭圆，远日点离太阳的距离几乎是近日点的两倍。与大多数“正派”的行星相比，自转轴倾角为120度的冥王星几乎是在倒立。

如此大的倾角会导致自转轴朝外的一端一次被黑暗吞没数百年。当冥王星远离太阳时，你会注意到在那些位于阴影中的地区，随着稀薄的大气凝成固体，地面会被严霜覆盖。这是太阳系中最长、最冷、最黑暗的冬天。在另一个极点，你会被太阳照耀几个世纪，不过你肯定晒不了日光浴。

因为严寒，大多数人都不会意识到由于空气中的些许甲烷，冥王星也有自己的温室效应。尽管温度永远冷得让人难受，但那些熟悉冥王星地貌的人，可以准确感知到哪怕很小的温差。

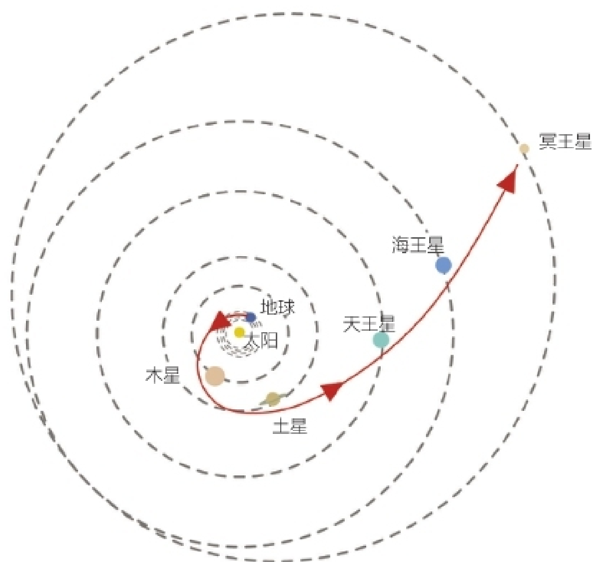
何日启程| WHEN TO GO

既然冥王星的轨道远近变化那么大，最好还是在它离太阳最近的时候赶过去。从冥王星的角度来看，地球的轨道几乎就在太阳旁边，所以那也是冥王星离地球最近的时候。如果上一次，也就是1989年的机会你没有抓住，你就必须等到冥王星下一次接近的时候了，那是在2237年。你可以为你的曾曾曾曾曾曾孙买一张票！即使是最快的路线也要花上10年的时间——如果你希望往返的话，至少需要20年。趁年轻安排假期，这样你就能在中年时回到地球。另一个选择是等待退休。用你最后的日子在这颗矮行星寒冷的平原上游荡，远离尘世的苦难。不管你选择什么时候离开，记得带上你最暖和的衣服，连同你的宇航服一起。冥王星总是比地球极地最冷的冬天冷得多。

漫漫长路| GETTING THERE

如果你不打算到达之后立即停下，去冥王星的速度就能快得多。用化学火箭直接飞越需要8～20年的时间，这取决于你的轨迹和冥王星到地球的距离。当你快速冲向矮行星之外那些巨大的太空冰石块时，你可以抓拍几张照片。如果仅仅一次飞越不能让你满意，你的旅行计划就会变得复杂起来。冥王星的公转速度比地球慢得多，平均时速约为16812千米，为了匹配这个速度，你需要消耗大量的能量。

冥王星远在天边，沿途却有很多行星可以为游客提供引力助推。



霍曼转移轨道适用于公转轨道较短的内行星。到了太阳系外围，由于冥王星上的一年很漫长，走完这条简单的椭圆形路径需要几十年时间。木星的引力助推可以让你的旅程缩短几年，不过咱们还是面对现实吧——除非你选择一枚核弹驱动的火箭，否则冥王星之旅将十分漫长。忘记太阳能旅行吧，这个手段在离太阳这么远的地方效果并不好。考虑到漫长的旅行时间，你可能会选择永久定居。

到达之后| WHEN YOU ARRIVE

随着冥王星在视野中越来越大，你将看到其表面对比鲜明的暗斑和亮块，其中也包括那个著名的心形图案。你还会认出冥王星的卫星冥卫一和贯穿其表面的深沟。

在一间小小的舱室里被关了那么多年之后，你的抵达是件大事。一些人对于离开飞船上舒适的住所犹豫不决。等你最终鼓起勇气走出去时，你会看到一派冬日胜景。

寒冷且几乎没有空气的环境造就了清澈的天空，无论白天还是黑夜都繁星密布。太阳永远是天空中最亮的恒星，比地球上的满月亮数百倍。在冥王星向太阳靠近的那些年月里，天空中的太阳会越来越大。它离太阳最近的时候，太阳的大小看起来是最远时的2倍，亮度是4倍。在地平线上，太阳方向的天空是深蓝色的，而当你抬头时，它又会变为黑色。冥王星上的日落是一派异世景观。因为冥王星上一天的长度是地球一天的6倍多，所以一次日落要持续好几个小时。沉到地平线之下后，太阳就会立刻向各个方向发出蓝色的光芒。

到达之后，不要忘记给家里的亲朋好友发一条信息。从冥王星发送信息时，你需要格外耐心一点。因为冥王星的轨道形状太扁了，比起那些行星，你在不同位置发送信息所需的时间差异很大。根据你到达时冥王星在轨道上的位置不同，你的信息回到地球的时间短则3个小时，长可达7个小时。如果你想家了，可以用一台强大的望远镜对准地球，你会看到几个小时之前发生的事情——因为光走到你那里需要时间。这是一架回首往事的望远镜。

何以代步| GETTING AROUND

在冥王星表面进行长途旅行时需要加固的漫游车，这样才能应付崎岖不平的冰层。跳跃机很管用，它们可以避开这种危险的地形。在低重力环境中，它们能坚持很长的时间，哪怕是稀薄的大气层也无法对其产生阻力。如果你想要一次冥王星空中之旅，可不能乘坐飞机滑行，而是要借助火箭飞越天空。

在冥王星这样的冰封世界里，一种独特的代步工具是悬停车。靠舒适的加压车从车架底部排出热量加热结冰的表面，悬停车便可以产生一层气垫，你会以很小的摩擦力在光滑的平原上滑行。

在冥王星和它的小卫星之间来趟短途游是很容易的。由于重力低，也基本上没有什么大气，你不需要耗费太多燃料就能够摆脱它的拉力。只要达到每小时4345千米的速度，你就能回到太空。去附近的冥卫一旅行就如同在地球上绕了半圈，它距离冥王星只有20000千米，所以如果你以传统的地球速度发射，用不了1个小时就能到达。

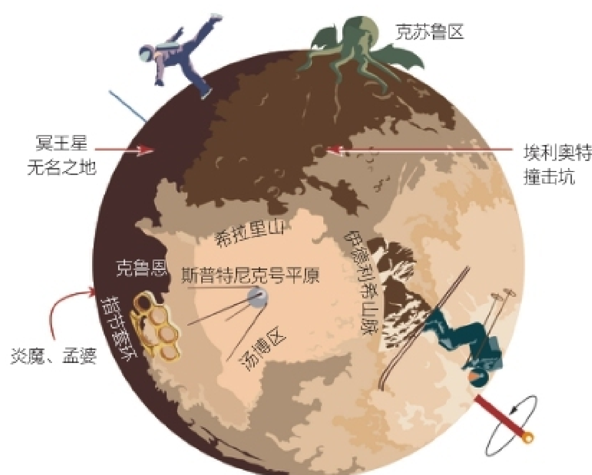
有何好看| WHAT TO SEE

[汤博区]

前往冥王星的游客都盼着看到著名的色泽明亮的心形汤博区。心形西侧的一瓣是一个被称为斯普特尼克号平原（Sputnik Planum）的冰冷洼地，深160千米、宽800千米。巨大的裂缝将平原分割得支离破碎，就像干旱沙漠中的裂缝一样——你要小心不要掉进去。人们认为这些构造

之下是缓慢搅动的氮冰区域，就像一盏移动速度超慢且非常冷的熔岩灯。因为水冰比氮冰密度小，你偶尔会看到一大块水冰钻出表面，如冰山一般漂浮在固态氮中。在汤博的这个区域旅行时，你会看到几十种不同的地形，从崎岖不平的坑地到明亮的平原，还有孤零零的山丘。

在你最喜欢的冰封矮行星上，无论什么季节都有足够的酷寒之趣可供探索。



[艾德里西山脉]

在心形西部的弧线上，一片混乱的山脉隐约可见。登山者会喜欢这些高度相当于北美洲落基山脉的山峰。水冰山泛着一层令人愉快的粉红色调，戴着白色的雪冠。它的粉红色源自渗入了那片纯白的甲烷，看起来就像脏雪一样。不幸的是，这些雪不适合融化后饮用，因为其成分是冰冻的甲烷，在冥王星上有句俗话：“粉雪莫入口。”在山峰之间有流动的冻结氮冰川，这种物质的气体形态在地球大气中占了大部分，好好看看吧，这就是空气冻结后的样子。

[希拉里山和诺盖山]

从斯普特尼克号平原向西南旅行，你可以看到希拉里山脉和诺盖山脉。它们的名字来自有记录以来第一批登顶珠穆朗玛峰的登山者埃德蒙·希拉里（Edmund Hillary）和丹增·诺盖（Tenzing Norgay）。这些山远没有珠峰所在的喜马拉雅山那么高。诺盖山脉的最高峰只高出其底部3300多米，而诺盖和希拉里在珠穆朗玛峰上的成就是8848米，或者说是从底部算起的4572米。如果你感觉这不如英国登山运动员在1953年的成就那样令人印象深刻，请不要气馁，记住，你已经旅行了至少43亿千米才到达这里。

[指节套环区]

在克苏鲁区和冥王星的心形之间有一大片深色的区域，其排列的形状就像指节套环上的指孔。其中的单个景点以神话中的生物命名，包括中国的孟婆、《指环王》中的地下恶魔炎魔，以及曼达安教传说中形若昆虫的地狱之主克鲁恩。

[克苏鲁区]

虽然名字来自美国作家洛夫克拉夫特[20]作品中形似章鱼的巨大怪兽，克苏鲁区却更像一条巨大的鲸鱼。

参观时，你会在非常黑暗、冰冷的地面上徒步旅行。那里覆盖着一层名为“托林”的富含碳的焦油色淤泥。冥王星的这些高地比冰冷的斯普特尼克号平原要古老得多，因此有更多的时间积累时间造成的伤疤——撞击坑。你会喜欢探索它们的秘密。90千米宽的埃利奥特环形山有一个奇怪的明亮冰圈。站在环上，你可以仰望3000多米高的中央山峰，它就像城堡一样高耸在冰封的护城河中间。

有何好玩| **ACTIVITIES**

[滑雪]

如果你追求比典型的度假区休假更激动人心的体验，可以去冥王星上偏远的沉降区，它们可以媲美地球上的任何黑钻石路线。加热的滑雪板会产生一层蒸气，减少与雪的摩擦。在甲烷雪冠上滑雪最容易，在那里你更有可能找到冥王星的粉雪。冥王星的质量只有月球的六分之一，其表面的低重力意味着一次普普通通的跳跃就能把你送上7米多的高空，而且你下来时还会软着陆。有许多陡峭的跳台可以玩飞跃。速度狂人们需要耐心一点，由于重力低，速度没有那么容易加上去。不过，这里没有空气阻力，如果下坡的时间足够长，你最终会达到惊人的速度。你甚至可以滑得虎虎生风——尽管严格来说根本没有风。

[溜冰]

你试过在岩石上滑冰吗？在零下240摄氏度的深度冷冻状态下，冥王星上的水冰就是这个样子。你在氮冰场会有更好的运气，因为氮气零下210摄氏度的冰点比水低得多，更接近冥王星的环境温度。你可能需要一定的时间来适应这种新的滑冰方式。在地球上溜冰时，你的溜冰鞋会在一层液体上滑过，而在冥王星上，氮冰会直接变成气体。

[登山]

冥王星的粉红色山脉有着看似崎岖不平的悬崖，但是由于重力低，它们非常容易攀爬。你需要用到结实的攀冰装备，比如冰爪和冰镐。人

们有时会对低重力环境攀登的安全性掉以轻心，不过别忘了，虽然你有可能从更高的地方跌落下来而不受伤，但如果是从悬崖上掉下来的话，你还是可能会丧命。

[定点跳跃]

想象一下，爬上一座30米高的塔，然后跳下来。由于冥王星这颗矮行星的低重力，你可以这么做而不会摔断腿。跳起之后，你会像雪花一样轻轻地飘下来。虽然看起来你的跌落将会永远如此，但事实上，随着你不断靠近地面，你也会落得越来越快。当你到达地面时，你的速度只会相当于从地球上2米高的墙上跳下来。你不需要降落伞——即使有降落伞，它对你来说也没有任何意义，因为冥王星上几乎没有大气。一个很受欢迎的定点跳跃地是在斯普特尼克号平原宽阔的深坑里。

[玩气垫曲棍球]

如果你在冥王星上将冰球加热到地球的室温程度，它会立即让它下面的冰猛烈汽化，于是这颗矮行星的表面就成了你的个人气垫曲棍球场。不过一定别让冰球停下来，否则它会在冰上烫个洞然后消失。

[为冥王星的矮行星地位辩论]

要想卷入一场关于冥王星的激烈辩论，没有什么地方比这颗矮行星本身更合适的了。一个名字有那么重要吗？根据国际天文学联合会的规定，一个天体若要被称为行星，需要满足三个条件。第一，它必须绕太阳运行；第二，它的质量必须足够大，能在自身重量作用下大体呈球形；第三，它应该已经清空了轨道周围的区域，也就是说没有其他物体与它共享绕太阳运行的轨道。

最后一个条件淘汰了冥王星，许多其他的冰封世界都在与它共享轨道。它还有其他一些方面的奇怪之处，比如它的轨道面与各大行星轨道面有较大的夹角。此外，太阳系中有许多物体与冥王星相似（海卫一比冥王星大），却从未被认为是行星。我们要么降级冥王星，给太阳系留下八大行星，要么继续把冥王星认作行星，但这有可能会让太阳系的疆域中出现更多行星。

不管理由如何，把冥王星降级为矮行星对于精明的太空旅行者来说是件好事。冥王星之旅的折扣更低，它会变成一个省钱、宁静的度假地。

附近有什么| WHAT'S NEARBY

你可能在照片中看到过冥王星的主要卫星：冰天雪地的冥卫一。这颗矮行星还有一组较小的卫星，分别被命名为冥卫二至冥卫五。冥卫二

和冥卫三这两颗足球形状的卫星会令探访者困惑不解，因为它们的自转不可预知。如果你在这两颗卫星上待一段时间，你会发现每天的长度都不一样，日出的位置也会不断变化。这种缓慢而混乱的自转是它们与冥王星、冥卫一和其他卫星相互作用的结果。重力的影响导致了乖张失常的摇晃。

前往比冥王星更远的地方探险时，你可能会选择去参观另外几颗矮行星，或者到围绕着太阳的巨大环状区域柯伊伯带，探访分布在那里的一些冰冷的小彗星。冥王星、它的卫星以及所有那些遥远的冰雪之地都被称为柯伊伯带物体。

[冥卫一]

在冥王星的天空中，巨大的冥卫一赫然在目，它的大小相当于地球天空中满月的两倍。冥王星每次自转一周，冥卫一也就公转一周。冥王星的一半表面从未见过这颗卫星；同样，冥卫一也有一半表面从未见过冥王星。虽然待在面向卫星的一侧更贵，但是那里的美景还是值得多花那笔钱的。

冥王星到冥卫一的距离和上海到布宜诺斯艾利斯的距离一样——在太空里，这就相当于跳过一个水坑。由于质量相近，冥王星和冥卫一更像一对围绕着彼此旋转的双星，而不是一颗卫星围绕着一颗（前）行星。它们就像两个牵着手绕圈的人，被困在重力之舞中。因为地球的质量比月球大得多，所以月球在移动而地球静止的观点有一定道理。实际上，地球和月球围绕着一个叫作公共质心的点旋转。具体到冥王星和冥卫一而言，质心远在冥王星之外，所以冥王星和冥卫一在互相绕行的过程中看起来都有很大的移动。试着把你的飞船停驻在它们之间，这样你就可以看到两颗星都在围着你转。



冥卫一。

——

美国国家航空航天局 / 约翰 · 霍普金斯大学应用物理实验室 / 美国西南研究院

你可以去参观宁静谷（Serenity Chasma），这是一条环绕卫星一周的大峡谷。它比美国的大峡谷更长、更深，可能是由于冥卫一的海洋冻结膨胀，在地表产生深深的裂缝而形成的。你还应该去看看冥卫一的沟中之山。这座独特的山坐落在一处深坑的中心，起源仍然是一个谜。

随着你在冥卫一不同地区的游历，你会注意到其颜色的变化。在赤道附近，地面颜色比更黑、更红的两极明亮一些。北极附近一个特别黑暗的区域得到了托尔金《指环王》中凶险之地“魔多”的名字，书中人物的名言“你不可能随随便便走进魔多”也适用于这里，不过原因是你很难在只有相当于地球3%的重力下行走。

[妊神星]

冥王星和冥卫一不是你为了逃离尘世所能抵达的最远地方。太阳系的偏远地带中还有别的矮行星在游荡。妊神星与太阳的平均距离比冥王星更远，体积是它的三分之一。这颗形似新生儿细长头部、长度是宽度两倍的矮行星被赋予了夏威夷分娩女神的名字。它不寻常的形状是由其超高速自转造成的——妊神星的一天只有4个小时。站在上面，你可以感知到遥远的太阳和星星每日起起落落的运动，就像在观看地球夜晚的延时影片。它的两颗卫星得名于妊神的两个女儿，即夏威夷的守护神希亚克和海洋女神纳摩加。

[鸟神星]

这个遥远世界与太阳的距离介于地日平均距离的38～53倍之间，与它相比，冥王星显得不那么遥远了。它以拉帕努伊岛神话中的人类创造者和生育之神的名字命名。这个岛被一些人称为复活节岛，而拥有一颗卫星的鸟神星是在2005年复活节之后不久被发现的。

[阋神星]

这颗矮行星和它的卫星最初被赋予了连续剧《战士公主西娜》（Xena: Warrior Princess）中两个角色的名字：西娜和加布里埃尔，但它很快被重新命名为希腊神话中掌管冲突与不和的女神厄里斯之名，而阋卫一则得到了犯罪女神底斯诺弥亚的名号。当初被发现时，阋神星在行星分类问题上引发了很多争议。那时冥王星仍被认为是一颗行星，而阋神星在许多方面与冥王星相似。如果冥王星是一颗行星，那么阋神星不应该也是吗？毕竟它比冥王星还要大一点。但天文学家没有扩大行星俱乐部，而是将冥王星踢出了行星的行列，将冥王星、阋神星以及任何与它们类似的物体重新定义为矮行星。

对于潜在的游客来说，距离是阋神星的与众不同之处。它的轨道远日点位于地日平均距离的97倍之外。如果错过了它离太阳最近的时候，你必须等待557年之久才能赶上它下一次回到那个位置。在你去阋神星之前，我们建议你先反思一下自己对远离尘世、茕茕孑立的生活到底有多么向往。



第一颗有机器人探访的彗星 67P。

欧洲航天局 / 罗塞塔 / 导航相机

[丘留莫夫-格拉西缅科彗星]

这颗黑不溜秋、疙疙瘩瘩的彗星仿佛两个大团块粘在了一起，其长度大概相当于日本富士山的高度。它的名字来自其发现者克里姆·伊万诺维奇·丘留莫夫和斯韦特兰娜·伊万诺夫娜·格拉西缅科。幸运的是，它还有个好记的简称，67P。它的旅程从它自己的起源地、冥王星的老家柯伊伯带开始，一直延伸到内太阳系。在极低的重力条件下，你得十分小心——在接近时不要太快，否则你可能会被它黑色的表面直接弹开。探访期间要抑制住跳跃的冲动，因为一旦你跳起来，便可能是永远的解脱，再也没有回还之日。在欧洲空间局的罗塞塔项目中，67P成为第一颗接待了机器人访客菲莱着陆器的彗星。

和所有的彗星一样，67P进入土星轨道以内时，构成它的一些冰开始变成气体。这在原本漆黑的冰核周围生成了明亮的云，云反射光线，因此除非受到良好的防护，否则你很难待在它上面。当67P接近太阳时，站在它上面，你会注意到它拖着两条尾巴，一条气尾、一条尘尾。气尾指向远离太阳的方向，因为它受着太阳风的推力；而尘尾往往是弯曲的，指向轨道和气尾之间的某个地方。

虽然67P不会穿越地球轨道，其他的彗星却会。当这种情况发生时，它们会在身后留下一条由灰尘颗粒构成的痕迹，就像面包屑一样。每一粒细小的灰尘都会在天空中形成一道闪闪发光的条纹，共同造就一

场流星雨。看到它的时候，一定要记得许个愿！

回乡
HOMECOMING

一切美好的事物都会有结束的时候。随着回乡之日越来越近，你的期盼也会越来越强。保持忙碌有助于熬过等待的时光，你可以与地球上的亲朋好友重建联系，阅读关于地球的指南，最后逛一次你最喜欢的旅游景点。要知道，自从太空旅行时代开始，宇航员就一直在强调他们的旅行如何令他们更加感恩地球。

当你启程回家时，你在外星球上从点点繁星中看到的那颗暗淡蓝点会越变越大。你会因为史诗般的旅程即将结束而感到心痛，也会幸福地意识到，过不了多久，也许是几年来甚至是几十年来的第一次，你将再次把头靠在自己的床上，沉浸在熟悉的重力中。靠近地球时，你会看到地球大气层薄如利刃的辉光，怀念着这个看似微不足道的特征对它下面的亿万生灵来说是多么重要。

重新做回地球人并不总是一帆风顺的。英国宇航员蒂姆·皮克（Tim Peake）将6个月旅程过后返回地球的过程描述为“世界上最严重的宿醉”。你在太空里停留得越久，你在身体和精神上适应地球生活所需的时间就越长。微重力环境中的生活可能会使你变得虚弱、不协调，说不定需要几年时间才能恢复之前的体力。回家后要小心行走，避免碰撞。

你虚弱的骨骼——特别是臀部——可能会在压力下断裂。在刚刚回到地球的几天和几周内，你可能走路会有困难或者有点笨拙。你会忘记自己已经不能在某个表面上轻轻一推就穿过房间。很多人都会忘记，于是在取一瓶新酒的时候，会放开手里的酒杯，也正是因为如此，好多酒杯都被摔碎了——回到地球上后，你必须把杯子放在某个表面上。

许多长期太空旅行者会体验到文化冲击。根据你离开的时间不同，你回到的地球可能已经和你离开时的那个大不相同，这会让你觉得自己像是一个在时间中穿梭的局外人。你对音乐和时装的品位可能已经落后于主流文化多年。

如果你已经离开了很长时间，你可能会忘记生活在一个支持人类生活的全天然环境中是什么感觉。在气候受控的定居点里生活几个月、几年甚至几十年之后，当你在某个典型的秋日，面对着气温或可起伏10摄氏度、20摄氏度乃至30摄氏度的户外天气，你会感觉到头昏脑涨。不管你是来自最热的撒哈拉沙漠还是最冷的西伯利亚角落，你都有可能发现自己在前所未有地享受着家乡的极端环境，要么兴奋地脱到只剩内衣，在闷热的天气里保持凉爽，要么在早上五点刮除着汽车挡风玻璃上的冰。

你有可能会决定回来后搬个家，定居到赤道附近的某个地方，那里一年四季都很温暖，你永远不需要外套。或者你可能会兴奋地看到自己如何在极地过活，在那里的生存从地球标准来看颇为艰难，但是用外星标准衡量一下，还算相对容易。

不管你最终留在哪里，你都很有可能会享受地球上四个迥异的季节，就好像从来不曾体验过一样，你沉醉于冬天白雪覆盖的肮脏街道、春天的泥泞、夏天的闷热和深秋刺骨的风。

不管你在一年中的什么时候回来，或者遇到什么样的天气，你都会惊讶于自己会因为小事而变得兴奋。天气不好的时候，你会发现自己出门时没有穿夹克甚至没有穿鞋，因为你想体验大自然带给你的一切感受。你会因为朋友们抱怨寒冷、炎热或者暴风雨而感到惊讶，与你在远离地球的假期中所面对的太空天气相比，这些自然现象看起来是那么温和。你可能会发现自己总是忍不住去看无垠的蓝天和天上蓬松的白云。太阳落山之后，你会盯着漆黑的夜空和点点繁星，感叹你去过的那些地方。你很难控制住自己不跟陌生人陷入长谈，聊一聊宇宙的美丽、人类的脆弱，以及尽一切努力保护家园的紧迫性。

此外，你可能很快就会被地球生活中的种种烦心事激怒。在城市里，交通堵塞很常见，尤其是在一天中的某些特定时候。机场通常很拥挤，而你会定期接受安全检查。水上旅行可能会稍微愉快一些，但是速度很慢，服务也不太正规。你需要尽可能在非高峰时段旅行，那时地球70亿人口中，走在路上的人相对较少。如果你去了太阳系比较偏远、人烟稀少的地方度假后回来，任何类型的人群都有可能让你感到喘不过气来，或是容易引发你的恐慌。

你会被地球上各种各样惊人的自然美景震撼。你可能已经忘记了流水有着什么样的声音，或者一大片土地可以完全被茂盛的绿色植物覆盖。森林可能一开始会让你感到焦虑不安，而在开阔的沙漠里你可能会感觉更舒服。见到环形山、峡谷、山脉和火山，你很难不拿它们和你在旅途中看到的同类相比较。既然你回来了，就花时间享受地球吧！尽管所有从木星回来的人都将永远怀念它明亮的极光，哪怕地球上最美的极光也不足以与它相提并论，但我们星球上的许多自然特征足以与你在太空度假时看到的景象相媲美。

每一次痛快的假期过后，回到正常生活都可能是苦乐参半的。由于长期缺勤，你很有可能必须换个工作。利用这段时间重新考虑一下什么才是最重要的。你可能会决定致力于改善地球居民的条件，或者保护让这颗星球生机勃勃的脆弱环境。无论你在恢复地球上的日常生活之后有何规划，回顾一下你的太空之旅，把它看作一段真正把一切抛在脑后的时光。每当生活给你压力时，你都可以仰望夜空，想象自己身在群星之中。

致谢

ACKNOWLEDGMENTS

这本书的面世离不开“游击科学”背后的天才们，他们致力于扩展想象的边界，为我们的怪异想法提供一片成长的天地。我们永远感激珍·黄、马克·罗森和佐伊·科尔米尔，早在2008年，他们就在英国这片泥泞的土地上创造了这个独特的集体。我们还要感谢路易斯·巴克利、珍妮·乔普森、莎拉·巴克、凯尔·玛丽安·维泰博、瑞秋·卡普夫·雷迪、皮格莱·塔瓦卡里和玛丽莎·查赞，他们为“游击科学”做出了许多贡献。特别鸣谢珍妮·乔普森，她最早提出了跨星系旅行社的想法，这是一个能让老式的“复古未来主义”科幻小说发扬光大的地方。马克·罗森一直是一位不可多得的顾问，在他的协助下，跨星系旅行社在美国成立了分社。

数十人帮助我们这个不起眼的小太空旅行社在美国、英国的节庆场合、博物馆和废弃店面开门迎客。所有的志愿者、天文学家、天体物理学家和太空旅行社代理人不辞辛劳，致力于让数千名信任我们的路人感到开心，为此，我们的感激之情难以言表。我们非常感谢史蒂夫·托马斯，他的想象技艺把跨星系旅行社带到了现实。你的才能是灵感的永恒源泉。没有你的创造，跨星系旅行社只能是一具冰冷的尸体。面对我们没完没了的调整、翻来覆去的修正、科学上的吹毛求疵和失败的创造性实验，史蒂夫为这本书打造了插图，我们特别要感谢他在这个过程中表现出的超凡耐心。

我们向以下人士献上特别赞誉：作为跨星系旅行社的代办员和书籍顾问，从一开始就支持我们，随时愿意向我们提供身体力行的帮助和精神上的支持的费里斯·贾布尔；为了我们在纽约总督岛上的美国首秀，帮助我们把多得离谱的器材搬到一艘游船上的科林·考克斯；我们的首批美国代办员之一，开发了令人惊叹的Exoplanet应用程序，使得跨星系旅行社的访客可以欣赏到各种迷人异星世界的天体物理学家汉诺·赖因；在早期向我们提供了宝贵支持的卓越代办员芮妮·哈洛泽克和卢申·沃科韦兹；为我们的创新项目提供了空间的亚努什·贾沃斯基和chashama艺术组织的所有优秀人士；帮助我们在曼哈顿开设了第一家临时概念店的凯特琳·普雷斯特和米特拉·卡波里；用他的天赋实现了前所未有的客户服务体验的出色制作人扎克·科普奇雅克；我们的科学家奥尔·格洛尔、薇薇安娜·阿夸维娃、斯蒂芬·穆罕默德、胡安·卡米洛·伊班涅兹-梅西亚、亚当·布朗、刘易斯·达特内尔、亚当·斯蒂文斯、安·波萨达、莎拉·皮尔森、费德里卡·比扬科、科特·希尔、罗宾·罗伯茨、安德烈·德尔津斯基、泽夫·佩诺伊，以及在旧金山、华盛顿、纽约、伦敦加入我们规划空间假期项目的多位科学家、演员和志愿者；那位就职于MetroPCS电信公司，针对如何让强硬的纽约人考虑到月球度假（以及/或者更换他们的电话服务运营

商）提供了高明建议的朋友；赋予外星旅行摄影独特风格和优雅视角的林恩·斯普莱恩和赛琳娜·唐。最后，我们还要感谢众筹网站Kickstarter上所有的支持者、客户以及千千万万的太空访客，他们从太空里寄来明信片、在月球和火星上与我们合影，并推动着我们不断思索在无垠太空里度假的无限奥秘。

我们很高兴有那么多人为这本书的面世投入时间、精力和支持。我们特别感谢永远耐心的詹姆斯·赫德伯格，他精到的批评和物理专业知识指导了我们的写作，而他的厨艺在本书诞生期间滋养了我们的身体。我们感谢接受采访或者回答问题的所有科学家和航天工业专家，包括理查德·施穆德、特德·萨瑟恩、乔纳森·麦克道尔、琼·亨特、保罗·斯普迪斯、田中隆充、吉尔·科斯汀、马特·海夫力、吉姆·帕帕多普洛斯、杰弗里·兰蒂斯、基根·柯克帕特里克、莎拉·菲珍茨、罗伯特·斯道姆、丹顿·埃贝尔、卡特丽娜·得克利尔、大卫·布莱维特、汤姆·斯塔尔拉德、安德鲁·因格索尔、马克·莱蒙、迈克尔·珀森、佳尼·拉德鲍、P.J.布朗特、杰西卡·拉达茨、艾米莉·劳舍尔、保罗·申克、迈克尔·布施和特里斯坦·吉洛。感谢阿曼达·穆恩，在我们考虑如何将经验写成一本书的时候，她提供了宝贵的反馈和支持，还要感谢NeuWrite的所有才华横溢的作者和科学家，他们参与了早期章节草稿的编写。

感谢美国国家航空航天局（NASA）在公共领域提供可免费使用的精彩数据和高分辨率图像。请注意，NASA及其任何附属机构不以任何方式为本书内容提供担保。

特别感谢玛拉·格伦包姆对我们的支持并把我们介绍给出版代理蕾切尔·沃格尔。感谢凯蒂·皮克向我们介绍斯蒂夫·托马斯的艺术并提供设计建议，感谢“友邻天文学家”网站（friendlyneighborhoodastronomer.com）的艾琳·皮斯检查本书的部分内容以确保准确性。感谢我们的编辑梅格·莱德以及企鹅兰登书屋的整个团队，他们对这个项目的热情自始至终未曾衰减。

加纳·格鲁赛维克要感谢她在美国自然历史博物馆的同事，尤其是莫迪凯-马克·麦克·罗、尼尔·泰森、阿什莉·帕涅塔、斯塔迪娅·拉瑟其-库克、布莱恩·阿博特、卡特·艾玛特以及图书馆工作人员。她还要感谢她的朋友和家人，杰夫、莎拉、米拉和格雷格，斯蒂芬妮·维克斯特拉、道恩·尚、乔斯林·塞萨、乔什·皮克、马克·维勒、贝基·伍德、阿莱塔·蒂贝茨和理查德·蒂贝茨夫妇，以及克里斯丁·刘易斯和罗根·刘易斯对她不可或缺的鼓励和陪伴。她一直因为有幸在自己的生活中拥有如此出色的人而欣喜不已。

奥利维亚·科斯基感谢詹姆斯在她长时间面对着笔记本电脑屏幕的时候几无怨言地做饭、清洁、给出建议，并照顾他们的新生宝贝。她还感谢她的父母、兄弟姐妹、姻亲以及诸多亲朋好友的支持。

参考

REFERENCES

为了编写这本指南，除了与科学家和其他专家进行对谈，我们还阅读了数十本书，梳理了大量NASA的技术报告、研究员博客和科学论文，并花费了数不尽的时间浏览太空任务网站。在这些网站中，关于或远或近的太空度假目的地的信息、图像和地图令人眼花缭乱。要想得到我们的信息来源的完整列表，请访问guerillascience.org/intergalacticsources。

无论太阳系内外，对于你喜欢的度假地点，你可以在NASA网站nasa.gov上找到数不尽的信息。对于那些有兴趣深入了解太空探索方面的技术和科学报告的人来说，https://www.sti.nasa.gov/是一个可以着手开始研究的好地方。如果你有最喜欢的地方，想要一直跟进下去，我们建议你访问以下网站：

月球：lunar.gsfc.nasa.gov/

水星：messenger.jhuapl.edu/

金星：global.jaxa.jp/projects/sat/planet_c/

火星：mars.nasa.gov

木星：missionjuno.swri.edu/

土星：saturn.jpl.nasa.gov/

冥王星：pluto.jhuapl.edu/

如果海王星和天王星是你的心仪之地，而且你渴望了解这些星球的最新消息，我们很遗憾地告诉你，已经很久没有人在假期或者其他任何时间里探访过这些地区了。在http://voyager.jpl.nasa.gov/上保存着存档的老照片，但是如果你想了解八十年代末以来海王星和天王星的情况，请致电当地政府代表（或空间企业家），告诉他们你希望尽早看到这些早就应该完成的任务成果。

[1] 关于月球的形成，学界存在不同的假说，目前得到普遍认可的是撞击说。

[2] 平克·弗洛伊德乐队曾于1973年推出专辑《月之阴暗面》（The Dark Side of the Moon）。

[3] 一般认为，月海是由月球内部的熔岩通过火山活动溢到低洼区域而形成的，跟小行星撞上月面没有直接的关系。

[4] 约翰·张伯伦（1927—2011），美国抽象表现主义雕塑家；福里斯特·迈尔斯，生于1941年，美国雕塑家；大卫·诺夫罗斯，生于1941年，极简主义艺术家；克拉斯·欧登伯格，生于1929年，瑞典公共艺术大师、波普艺术巨匠；罗伯特·劳森伯格（1925—2008），美国波普艺术代表人物；安迪·沃霍尔（1928—1987），美国波普艺术代表人物。

[5] 51区是坐落于内华达州的军事基地，是美国政府的最高机密。

[6] 卡洛斯一词源自拉丁文“calor”，意为“热”。

[7] 美国先锋音乐大师约翰·凯奇以一曲《4分33秒》闻名于世。这首曲子全部由休止符构成，在长达4分33秒的时间里，约翰·凯奇静坐在钢琴前，一动不动。

[8] 一个天文单位约为1.496亿千米，相当于地球与太阳间的平均距离。

[9] 晨昏线（terminator）一词意为“终结者”，此处暗指电影《终结者》中的金属机器人。

[10] 发射窗口指运载火箭适合发射的时间范围。

[11] 1985年，曾登上过月球的美国宇航员巴兹·奥尔德林提出了循环轨道的设想。这种轨道的完整周期为15年，其间8次飞越地球、7次飞越火星。

[12] 最新（2018年）的研究表明，这些亮斑里含有大量的水合碳酸钙。

[13] 因为与口哨的声音类似，航行者1号飞船在木星上探测到的无线电辐射被称为“哨声”（whistlers）。

[14] 汤姆·萨克斯，美国设计师、雕塑家，曾与耐克合作推出“太空计划”系列运动鞋。

[15] 小卫星指小于1000千克的卫星。

[16] 坎昆为墨西哥著名的旅游城市，位于加勒比海北部。

[17] 死星是《星球大战》中的战斗空间站，外形与土卫一十分相似，但早在土卫一的第一张特写照片传回地球之前，《星球大战》的第一部电影就已经上映。

[18] 几位人物分别出自蒲柏的《夺发记》（The Rape of the Lock）和莎士比亚的《暴风雨》《仲夏夜之梦》。

[19] 厄休拉和卡尔弗尼亚分别出自莎士比亚的戏剧《无事生非》和《裘力斯·凯撒》。

[20] 霍华德·菲利普·洛夫克拉夫特（Howard Phillips Lovecraft，1890—1937），美国恐怖、奇幻小说作家，以“克苏鲁神话”系列小说闻名。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的

泛阅读服务



专属社群 独家福利

精品共读 活动特权

手机扫码

加入未读 Club 会员计划

未讀

茶杯里的风暴

STORM IN A TEACUP

用日常之物
揭开
万物之理

无论在厨房，
还是在宇宙最遥远的彼端，
物理学的奇妙之处
就在于原理通用、随处可见。

[英] 海伦·切尔斯基——著　阳曦——译

《迷人的材料》《诗意的原子》之后
「未读·探索家」
又一本大师级科普作品

每一件平凡琐事，
都藏着星辰大海的秘密

万维钢 作序推荐

BBC 专栏作家 / 主持人
剑桥大学物理学博士 / 伦敦大学物理学家

通俗演绎万物运转之谜，发现平凡日常中的物理之美

北京联合出版公司

版权信息

茶杯里的风暴

Relationships

作者：[英] 海伦·切尔斯基(Helen Czersk)

译者：阳曦

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

献给我的父母：

扬和苏珊。

上大学的时候，有一阵子我在祖母家复习物理。

我的祖母是个非常务实的北方人，

当我告诉她我正在研究原子结构的时候，她非常惊讶。

“噢，”她说，“弄明白了又能干啥呢？”

这真是个好问题。

推荐序

真物理学家看门道

物理学一向都是最宏大、最刺激的学问。如果你对职场攻略、理财指南和宫斗电视剧不屑一顾，选择把时间交给一本物理书，你想要的肯定不是普通的知识。你想知道宇宙的起源、量子力学的神奇之处、爱因斯坦的精妙思想、暗物质和暗能量之谜、超弦理论的难题。你想得到这个世界的终极解释。你想体验最深刻的智慧。读物理学家写的书，通常是仰望星空的姿态。

但是海伦·切尔斯基的这本《茶杯里的风暴》，想给你看的可不是这些。这不是一本仰望星空的书。

这本书写的是物理学的应用——确切地说，是那些比较常规的物理学知识在日常生活中的应用。

这听起来好像一点都不刺激，但是我可以告诉你这本书刺激在哪里：它能检验你学的是“真知识”还是“谈资”，它还会让你见识一套高级思维方法。

理查德·费曼是个有很多粉丝的物理学家，人们粉他的一部分原因是他喜欢指出周围人的愚蠢之处。费曼曾经在巴西访问和工作了一年，他给巴西学生上了基础物理课。他注意到一个大问题。

费曼说：“巴西根本没有在教科学。”

费曼发现，巴西那些“物理学得好的学生”，其实根本没有掌握物理学。他们能把各种物理概念和定律的语句背得滚瓜烂熟，会用公式精确解题，但是他们不知道那些概念、定律和公式是什么意思。这些所谓的学霸能背诵教科书中经典物理实验的步骤，但是费曼给他们布置了一个

自己动手做实验的作业，他们完全不会做。你能说这些人“懂”物理学吗？

我以前听说过这段典故，觉得这是应试教育的恶果。应试教育把什么知识都当成考试素材，最终考察的不是真正的知识水平，而是记忆力和执行规则的能力。但现在我觉得这不仅仅是应试教育的事，这是所有国家的所有读书人都面临的一个困境。

这个困境就是，“知道”和“会用”是两码事。现在有句话叫“听过很多道理，却依然过不好这一生”，差不多就是这个意思。

在互联网时代，获得一个知识，包括理解这个知识，都是很容易的。只要有足够的好奇心，你就很可能已经积累了大量的知识。比如说，你知道“薛定谔的猫”是什么意思，而且你还充分理解了这个概念背后量子随机性的原理，你得到了很大的乐趣，可能还为此感到一点点自豪。

那这时候，如果妈妈问你“薛定谔的猫”有啥用，你也许会非常大气地说，谈“有没有用”太俗了——科学事业就是要探索和发现，真正的科学家哪有那么功利啊。

这句话对倒是对，可是如果你只求知而不关心怎么用，那你就只是一个“知道分子”，你只能欣赏和赞叹那些知识。科学知识对你来说跟玄幻小说的剧情没有本质区别，都只是给大脑吃的零食和令人愉悦的谈资而已。

现在很多人一说科学就是什么“伟大的好奇心”——以我之见，好奇心被高估了。玄幻小说也可以激发和满足好奇心。单纯的好奇心不能带你走很远。

也许你可以尝试一种更高级的思维。这个思维要求你掌握高质量的知识，然后在不同的地方识别和应用这些知识。

尝试了这种思维，你才能知道什么叫“知道”。

比如说，你知道热量是怎么回事，你也知道鸭子和人一样，是恒温

动物。那你知道在冰水里游泳的鸭子，它们的脚为什么不怕冷吗？再比如说，你学过有关气压随温度变化的知识，那你知道为什么爆米花受热只会膨胀，而不会炸得四分五裂吗？

你可以把《茶杯里的风暴》这本书，当作一本思维训练手册。有些司空见惯的东西一旦细想，你就会发现自己的知识体系简直千疮百孔。

种子发芽以后，为什么总是往上长呢？如果种子能识别哪个方向是向上，其中必定有一个什么机制能让它感受到重力！这个机制是什么呢？又或者，是因为光线总从上方来吗？书里有答案。

但我看重点不在于答案，而在于你能不能提出问题。只会赞叹而提不出问题，你就是个看热闹的。能提出关键问题，你才算会看门道。掌握这套高级思维，你学什么都没有白学。这样你才真的有可能用知识去改变世界。

古希腊哲学家泰勒斯有一次晚上走路的时候只顾着仰望星空，一不小心掉进了坑里，有人嘲笑他知道天上的事情，却看不见脚下的东西。孔子专门研究经天纬地的大学问，老农民笑他四体不勤五谷不分。我看这些嘲笑也不见得没有道理

——仰望星空和大学问固然了不起，能在日常小事中看出门道来，才是真本事。

万维钢

（作者系科学作家，“得到”App《精英日课》专栏作者）

序章

我们生活在地球与宇宙的交界线上。晴朗的夜晚，谁都能看到璀璨而广袤的星空，亘古不变的灿烂繁星以独一无二的方式标记我们在宇宙中的位置。这些星辰进入了每一种文明的视野，但从未有人真正触摸过它们。我们在地球上的家园恰似星空的反面：混乱、无常、花哨，每天充斥着各种缠人的琐事。然而，平凡俗世中同样藏着宇宙运转的规律。物理世界的丰富多彩超乎我们的想象，同样的原子和同样的规则以不同的方式组合在一起，足以产生无数截然不同的结果。不过，这种多样性并非全无规律，世间万物的运行都遵循着自然的法则。

如果你把牛奶倒进茶水里快速搅拌，杯子里就会出现旋涡。两种液体旋转交缠，几乎称得上泾渭分明，而这样的奇景只能维持几秒，片刻之后，两者就会完全融合在一起。不过，这短短的几秒钟足以让你看清，不同的液体会在美丽的旋涡中逐渐融合，而不是立即交融。我们在其他地方也能看到同样的现象。从太空中俯瞰地球，你会在云团中发现相似的旋涡，暖空气和冷空气不会直接融合，而是互相缠绕旋转，仿佛在跳一曲美妙的华尔兹。大西洋上空的旋涡定期向东运动，带给英国变幻无常的天气。当北方极地的冷空气和南方热带的暖空气相遇时，你可以从卫星云图上清晰地看到它们绕着圈子彼此追逐。这样的旋涡叫作“低气压”或者“气旋”，气旋所到之处常会出现晴雨不定的多变天气。

乍看之下，旋转的风暴和马克杯里旋转的茶水似乎毫无关联，但它们相似的模式绝非出于巧合，其中蕴含的线索可以揭示更本质的规律。类似的构造隐藏着相同的道理，一代又一代人不断探索并通过严格的实验验证了这一点。这个探索与发现的过程就是科学：不断总结、验证我们对世界的理解，并发掘更多有待探索的东西。

有时候，我们很容易在不同的地方发现同样的模式；不过也有一些时候，事物间的联系没有那么明显，而最终找到真相时，你收获的满足感会更强烈。举个例子：你或许根本不会想到蝎子和骑行者有什么相似之处；事实上，两者会利用同样的科学技巧来保命，不过方式截然相反。

没有月亮的夜晚，北美的沙漠寒冷寂静，只有微弱的星光照耀着地面，你似乎不可能在这里完成对任何东西的搜寻。不过，为了找到一种宝贝，你带着特制的手电筒走进了黑暗。这种手电筒发出的是人类看不见的光——紫外线，也叫“黑光”。紫外线在沙漠中传播，但你看不见它，无从分辨它照到了哪里。然而突然之间，黑暗中爆出了一团怪异的蓝绿色闪光——紫外线落在了一只蝎子身上。

人们就是这样寻找蝎子的。这种黑色蛛形纲动物的外骨骼里有一种独特的色素，能够吸收我们看不见的紫外线，反射我们看得见的可见光。这的确十分机智，不过害怕蝎子的人可能无缘欣赏。这种光学魔术被称为“荧光性”。人们认为，蓝绿色的荧光能帮助蝎子在傍晚寻找最理想的藏身之地。紫外线一直存在，不过在太阳刚刚降到地平线下的傍晚时分，大部分可见光都已消失，留下来的只有紫外线。如果这时候蝎子还待在露天环境中，它的身体就会发光，变得十分显眼，因为周围其他的蓝光和绿光都已消失。哪怕蝎子的身体只露出来一点点，它也能探测到自己发出的光芒；于是它就会知道，应该再藏得深一点。这套信号系统简洁而高效——如果世界上没有紫外线手电筒的话。

幸运的是，对于恐惧蝎子和蜘蛛的人来说，要看到荧光，不一定非得走进节肢动物横行的沙漠不可。天气阴沉的清晨，城市里也随处可见点点荧光。我们不妨看看那些注重安全的骑行者：和周围灰暗的环境相比，他们身上的反光外套简直亮得刺眼。这些外套看起来像在发光，事实上，它们的确在发光。阴天的云层遮蔽了可见光，但大量紫外线仍能穿透云层。反光外套中的色素会吸收紫外线，反射可见光。这个原理和蝎子的把戏一模一样，不过人类和蝎子利用荧光现象的目的却截然相反。骑行者希望自己发光，因为这样一来，别人就更容易看到他们，由此可以减少事故的发生。对人类来说，荧光现象简直就是免费的午餐；我们本来看不到的紫外线转化成了可以利用的可见光，但我们不用付出

任何代价。

荧光现象本身已经足够迷人，不过对我来说真正的乐趣在于，物理学的金矿不仅仅是有趣的消遣，更是实用的工具，能在很多地方派上用场。在上面这个例子中，蝎子和骑行者利用同样的物理现象来保命。汤力水[1]在紫外线下也会发光，因为水中的奎宁具有荧光性。衣物彩漂剂和荧光笔的“魔力”同样源于此。下次当你看到用荧光笔做记号的段落时，请务必记得，荧光笔的墨水也是一种紫外线探测剂；虽然你无法直接看到紫外线，但荧光会告诉你，它就在那里。

我研究物理学是因为它能够解释我感兴趣的事情。物理学让我看到日常世界背后的规律。最棒的是，它让我能够亲自找出一部分规律。虽然我是专业的物理学家，但实际上，我的许多发现与实验室无关，也不需要复杂的电脑软件或昂贵的实验设备。最能带来成就感的发现常常来自与科学全然无关的日常小事。对物理学基础知识的点滴了解将整个世界变成了充满乐趣的玩具盒。

对于这些来自厨房、花园或者城市街道的科学发现，有时候人们多少会有点轻视。他们觉得这无非是小打小闹的消遣，对孩子来说当然重要，对成年人却没有什么实际的用途。成年人应该去买那种介绍宇宙运行规律的大部头才符合身份，但实际上，这种观点忽视了一个非常重要的道理：物理规律是放诸四海而皆准的。烤面包机就可以让你学习到最基础的物理学定律，而烤面包机的优势是，你家里很可能有一个，你可以亲眼看到它如何工作。物理学妙就妙在同样的模式处处通用：无论是在厨房里，还是在宇宙最遥远的彼端。从烤面包机入手的好处在于，就算从没担忧过宇宙的温度，你也会明白面包片为什么是热的。而且，一旦熟悉了某种模式，你就会在其他很多地方观察到它的存在，包括在人类社会最令人瞩目的那些成就之中。学习日常生活中的科学可以直接帮助你积攒关于世界运行规律的点滴知识，任何一位想要参与社会运转的公民都应该具备这些常识。

你有没有尝试过在不剥壳的情况下分辨生鸡蛋和熟鸡蛋？这里有个简单的办法。你可以把鸡蛋放在一个光滑坚硬的平面上旋转，几秒钟后用手指轻轻触碰蛋壳，让它停止转动，然后立即收手。一两秒后，看看

静止下来的鸡蛋是否会重新开始旋转。生鸡蛋和熟鸡蛋的外表可能毫无区别，但它们的内部截然不同，这就是秘密所在。熟鸡蛋是一个完整的固体，所以当你触碰它的时候，它会整个停下来；但是当你触碰生鸡蛋的时候，停止运动的仅仅是蛋壳，壳里的液体继续旋转，所以一两秒后，生鸡蛋会重新开始旋转，因为内部的液体会带动蛋壳转动。要是不信，你不妨自己找枚鸡蛋试试。这个现象背后的物理学定律是：物体总是倾向于保持原来的运动状态，除非你对它施加外力。生鸡蛋内的液体保持旋转，因为它没有变化的理由。这就是角动量守恒，这条定律可不仅仅适用于鸡蛋。

哈勃空间望远镜就像在绕地轨道上飞速运行的一只眼睛，自1990年发射以来，它拍摄了无数壮美的太空照片。这台望远镜发回的照片让我们看到了火星、天王星环、银河系中最古老的恒星、名字和形态同样美丽的草帽星系（Sombrero Galaxy），还有庞大的蟹状星云。可是，在太空中自由飘浮的时候，它该如何稳定自己的位置和姿态，聚焦拍摄这些小小的光点？它又该如何判断自己的准确朝向？哈勃空间望远镜配备了6台陀螺仪，每台陀螺仪都是一个每秒能转19200圈的轮子。根据角动量守恒定律，这些轮子的转速将保持恒定，因为没有外力让它们减速。轮子转轴的指向也将始终保持恒定，因为它们没有理由移动。陀螺仪为哈勃空间望远镜建立了方向参照，所以望远镜的镜头可以聚焦于某个遥远的天体，想拍多久就拍多久。通过厨房里一枚小小的鸡蛋，你能看到人类文明最先进的技术产品所使用的物理学原理。

这就是我热爱物理学的原因。你学到的东西总能在别的地方派上用场，这是一场伟大的冒险，因为你不知道它将带领你走向何方。我们已经知道，地球上的物理学定律适用于宇宙中的任何地方。也就是说，每个人都能轻而易举地接触到推动宇宙运行的诸多基本法则。你甚至可以亲自验证它们。一枚鸡蛋可以孵化出放诸四海而皆准的规则。有了这些知识，你就能看到另一个崭新的世界。

在过去，信息比现在稀有。每一处知识的金矿都来之不易，价值连城。今天的我们生活在知识之海的岸边，海啸时时威胁着我们，有时甚至会让我们陷入迷惘。如果你能够得心应手地掌控现世的生活，那又何必继续追寻更多知识，何必让自己的生活变得更加复杂？哈勃空间望远

镜很棒，不过在你马上就要迟到的时候它也没法掉转镜头帮你找到钥匙，那有它没它又有什么两样？

人类对世界充满好奇，满足好奇心会带来极大的愉悦。要是能够亲手解开谜题，或者和别人一起走过发现之旅，你还会得到更强的满足感。你在玩耍中学到的物理学原理可以用来开发新的医疗技术，可以解释天气，可以制造手机、自清洁衣物甚至聚变反应堆。现代生活充满复杂的决策：花高价买节能灯是否值得？把手机放在床边睡觉是否安全？天气预报是否可信？偏光太阳镜和普通太阳镜有何不同？基本原理通常无法直接告诉你某个具体问题的答案，但要问出正确的问题，你离不开这些背景知识。习惯了自己寻找答案，面对无法立刻得到解答的问题时，我们便不会感到无从下手。因为我们知道，只要再想一想，就能理出头绪。要了解我们的世界，批判性思考至关重要，要知道，广告商可是一直在声嘶力竭地告诉你，让你相信他们什么都懂。我们必须自己寻找依据，思考是否真的应当赞同他们的意见。我们不仅要应对日常生活，还要为我们的文明负责。我们投票、购物、选择生活方式，每个人都是人类冒险团中的一员。世界如此复杂，任何人都不可能完全理解所有细枝末节，但在这条道路上，基本原理是价值连城的宝贵工具，值得你随身携带。

基于上述原因，我认为，运用物理学工具观察和理解世界不仅仅是为了找乐子，尽管我个人十分享受物理学带来的乐趣。科学不只关乎搜集事实，还涉及解决问题的逻辑推理过程。科学的关键在于，每个人都可以根据数据得出合理的结论。刚开始，人们的结论或许各有不同；但接下来，你可以搜集更多数据，判断哪种描述更契合真相，最终得出结论。这就是科学与其他学科的区别：科学假说必须提出可验证的具体预测。也就是说，如果你有了关于某个事物运行原理的想法，接下来应该做的是根据你的想法推出某个特定结果。再说具体一点，你必须努力寻找可验证的结果，特别是那些能够通过你的理论验证其谬误的结果。如果穷尽我们能想到的所有验证方式仍无法推翻你的假说，那么我们会谨慎地表示赞同：它很可能是描述世界运行规律的优秀模型。科学总在试图找出谬误，因为这是寻求真理的最短路径。

不必成为专业科学家，你也可以通过实验来认识世界。理解一些基

本的物理学原理会让你掌握正确的方法，学会自己解决很多问题。有时候，你甚至不必刻意思考，拼图会乖乖跳到自己的位置上。

我最喜欢的一次发现之旅始于失望：我做的蓝莓酱变成了粉红色，确切地说，是鲜艳的紫粉色。这件事发生在几年前，当时我正在罗得岛处理移居英国之前的一些琐事。大部分事情都办完了，但在离开之前，我还有一件事非办不可。我一直很喜欢蓝莓，这种可口的水果颇具异域风情，妖异的蓝色美得让人心醉神迷。在我居住过的大部分地方，蓝莓都少得令人泄气，罗得岛却盛产蓝莓。我想把夏天丰收的蓝莓做成果酱带去英国，所以在那最后的几天里，我花了一上午时间采摘、挑选蓝莓。

蓝莓酱最棒最让人着迷的地方在于，它是蓝色的。至少我是这样认为的。但大自然却另有主意。平底锅里冒泡的果酱有诸多特色，但蓝色绝不是其中之一。我把果酱装进罐子里，它的味道没的说，但挥之不去的失望和迷惑伴着粉色的果酱和我一起来到了英国。

6个月后，一位朋友请我帮他解决一个历史难题。当时他正在制作一套关于女巫的电视节目，他说，有记录显示，“聪明的女人”曾把马鞭草花瓣放在水里煮沸，然后将得到的液体涂在别人的皮肤上，以此来判断此人是否中了咒语。他想知道，这背后是否有某种原理，哪怕与巫术完全无关。我研究了一下，发现这里面还真有点科学道理。

紫色的马鞭草花、紫甘蓝、血橙等紫色和红色的植物含有一种名叫花青素的化合物。花青素是一种色素，它赋予了这些植物鲜艳的颜色。花青素有几种不同的版本，所以植物的颜色也有细微的差别，不过所有花青素的分子结构都十分相似。我要说的还不止这些。环境液体的酸碱度——pH[2]——也会影响花青素最终呈现的颜色。如果环境的酸碱度发生变化，花青素分子的形态就会发生微妙的变化，颜色也随之改变。它们是一种指示剂，一种天然的石蕊试纸。

利用这一点，你可以在厨房里玩出很多花样。你可以煮沸植物来提取色素，比如说，你可以将几片紫甘蓝放到水里煮沸，留下水（现在它是紫色的）。往水里加点醋，它就会变红；而洗衣粉（碱性）溶液会让它变成黄色或绿色。利用厨房里随手可得的原料，你可以调制出彩虹的

所有颜色。别问我是怎么知道的：我全都亲手试过。我喜欢这个发现，因为花青素随处可见，任何人都搞得到，不需要任何化学设备！

所以，那些聪明的女人或许是在用马鞭草花检测pH，而不是检测别人是否中了咒语 。皮肤的pH会自然地发生变化，所以将马鞭草混合液涂在不同人的皮肤上，就会得到不同的颜色。如果我刚跑完步，正是大汗淋漓、心情愉悦的时候，涂在身上的甘蓝水就会从紫色变成蓝色；要是不运动的话，甘蓝水就不会变色。那些聪明的女人或许发现了这个秘密，并对它做出了自己的解读。真相已经无法追寻，不过我觉得这是个合理的假设。

历史揭秘到此为止。我又想起了我的蓝莓和果酱。蓝莓的颜色也来自花青素。果酱的原料只有4种：水果、糖、水和柠檬汁。柠檬汁会催化水果里的天然果胶，让果酱变得黏稠。而柠檬汁之所以有这种效果，是因为它是酸性的。我的蓝莓酱之所以会变成粉色，是因为它在平底锅里完成了一次石蕊测试。要让果酱获得足够的黏度，它只能变成粉色。这个激动人心的发现几乎完全弥补了无法做出蓝色果酱带给我的沮丧。用一种水果制造出彩虹的完整色谱，这样珍贵的发现足以告慰我的失落。

在这本书里，我所做的就是将日常生活中的小事与我们所置身的广阔世界联系起来。我们将在物理世界中徜徉，看看爆米花、咖啡渍、磁性冰箱贴这样平凡的事物如何照亮斯科特[3]的探险之路，如何帮助我们完成医学实验，如何解决未来的能源问题。科学不是“别人的事情”，它与每个人息息相关，每个人都能用自己的方式加入这场探险。本书的每一章都会从一件日常小事开始，你或许见过它很多次，却从未深入思考过背后的东西；而在每章的末尾，我们将会看到，这些小事里的模式能够解释我们这个时代某些最重要的科技。每一次小小的探险都妙趣横生，所有碎片拼到一起带给你的满足感更是无可估量。

了解世界运转的原理还能带来科学家们很少提到的另一个好处：它会改变你的视角。世界充满了戴着各种面具的物理学模式，一旦熟悉了基本的原理，你就会看到不同现象背后的相同之处。我希望，在阅读本书的过程中，各个章节蕴含的科学原理能够潜移默化地帮助你构建看待

世界的新视角。在本书的第9章中，我将说一说这些模式如何彼此啮合，创造出人类赖以生存的三套系统——我们的身体、我们的星球和我们的文明。不过，你有权反对我的观点。科学的精华在于整合现有证据，通过实验验证原理，最终得出自己的结论。

茶杯仅仅是个开始。

第1章

爆米花和火箭

- 气体定律 -

玉米粒的微型高压锅

厨房里发生爆炸通常不是什么好事，不过有时候小小的爆炸能帮你烹制美食。干玉米粒含有多种营养成分（碳水化合物、蛋白质、铁和钾），但它们都被坚韧的外壳紧紧包裹在致密的种粒里。要得到这些营养成分，把玉米粒变成能吃的东西，你就得想点极端的法子，比如爆炸。幸运的是，玉米粒本身的特性决定了它很容易爆炸。昨天晚上我做了点爆米花。坚固强韧的外表下隐藏着柔软的内心，这样的发现总是令人欣喜。不过，玉米粒为什么会变成蓬松的爆米花，而没有直接把自己炸得粉身碎骨呢？

油烧热以后，我往平底锅里放了一把玉米粒，然后盖上锅盖，转身去烧水泡茶。屋外风暴肆虐，硕大的雨滴毫不留情地敲打着窗户。油里的玉米粒发出轻微的噼啪声，似乎一切平静，但事实上，平底锅里的好戏已经开场。每一粒玉米内部都有一个胚芽，它可以长成一棵新的植物，而胚乳则为新植物提供生长所需的养分。胚乳主要由淀粉颗粒组成，它的含水量大约是14%。玉米粒放进热油以后，胚乳内部的水开始蒸发变成气体。温度高的分子运动速度更快，所以玉米粒受热的时候，越来越多的水分子以蒸汽的形式在它内部左冲右突。从演化的角度来说，玉米粒种皮的主要作用是抵御外力侵袭，可是现在，它却不得不承受来自内部的暴乱。在这种情况下，种皮变成了一口迷你高压锅。变成蒸汽的水分子无处可去，所以种皮内部的气压越来越大。气体分子不断碰撞彼此和种皮，随着气体分子的数量和运动速度不断攀升，种皮承受的撞击力也越来越大。

高压锅用滚烫的蒸汽高效地烹制食物，玉米粒内部的小小高压锅也一样。就在我寻找茶包的时候，胚乳里的淀粉颗粒被烹制成了某种黏糊

糊的加压凝胶，而且玉米粒内部的气压还在继续增大。种皮能够承受的压强是有限的，玉米粒内部温度上升到180℃时，内部气压差不多达到了标准大气压的10倍，凝胶看到了胜利的曙光。

我轻轻晃了晃平底锅，听到锅里传出第一声爆裂的闷响。几秒钟后，噼啪声就密集得像机枪开火一样了，跳动的爆米花顶得锅盖不断颤动。每一声爆响都让锅盖边缘冒出一缕蒸汽。我倒了杯茶，就在这短短几秒内，平底锅里的爆裂声变得更加激烈，锅边冒出的蒸汽此起彼伏，接连不断。

爆炸发生的瞬间，游戏规则变了。在此之前，困在种皮内部的水蒸气是出不来的，随着温度不断升高，蒸汽使种皮内部的气压不断增大。坚韧的种皮破裂的瞬间，种皮内部的物质立即暴露在外部环境的压强（标准大气压）下，这些物质的体积也不再受限。淀粉凝胶内部灼热的分子仍在左冲右突，但外面却再也没有什么东西束缚它。于是凝胶开始爆炸性膨胀，直至其内部和外部气压相等。致密的白色凝胶变成了蓬松的白色泡沫，整个玉米粒向外翻了过来，然后逐渐冷却固化。整个转化过程就此结束。

把爆米花倒出来以后，你总会发现几个没爆开的“伤兵”，焦黑的玉米粒悲伤地躺在锅底。如果种皮破损，高温蒸汽会直接逃逸，玉米粒内部无法积聚气压，自然就不会爆开。正因如此，玉米可以用来做爆米花，其他谷物却不行，因为它们的种皮上有细小的孔洞。如果玉米粒太干——比如收获的时机不对——导致种皮内部的水分不足以在蒸发后产生足够的压强，它也不会爆开。少了剧烈的爆炸，原来不能吃的玉米粒到最后还是不能吃。

我端着茶和这碗烹制完美的爆米花走到窗边遥望外面的风暴。破坏有时候也不是坏事。



简单就是美，化繁为简的美更令人动容。在我看来，描述气体行为的定律就像视错觉的游戏，你以为自己看到了某样东西，可要是眨眨眼再看，它又会变成另一种截然不同的东西。

我们生活的世界由原子组成。这些微小的物质粒子拥有相似的结构：外层带负电的电子陪伴着内部带正电的沉重原子核，但不同的原子之间仍有区别。化学的故事讲的是电子如何按照量子世界的严密规则，让多个原子共担责任、改变阵形，以及支撑被俘获的原子核组成更大的模式：分子。

就在我敲下这些字时，在我呼吸的空气中，成对的氧原子（每对氧原子都是一个氧分子）正在以1500千米/小时的速度不断撞击以320千米/小时的速度运动的氮原子，也许还会撞上速度为1600千米/小时的水分子。不同的原子和分子在以不同的速度运动，这里的混乱与复杂超乎想象。每立方厘米空气中大约有30000000000000000000（3×10^{19}）个分子，每个分子每秒大约会发生10亿次碰撞。面对这么复杂的问题，你可能会觉得最明智的做法是直接放弃，转而研究脑科手术、经济理论，或者干脆黑掉一台超级计算机——干什么不比这个简单呢？

那些研究气体运动的先驱当年根本不知道自己面对的到底是什么，不然他们可能根本没有勇气探索下去。无知也有无知的好处。19世纪初，人们还认为原子的概念不科学；直到1905年，人们才找到了原子存在的确切证据。而在1662年，罗伯特·波义耳（Robert Boyle）[4]和他的助手罗伯特·胡克（Robert Hooke）[5]只有玻璃器皿、水银、密闭容器里的空气和恰到好处的无知。他们发现，如果增大压强，容器内空气的体积会随之缩小。这就是波义耳定律：气体压强与体积成反比。一个世纪后，雅克·查理（Jacques Charles）[6]发现，气体的体积与温度成正比。温度升高至原来的2倍，气体体积也会膨胀至原来的2倍。这简直不可思议。复杂的原子运动怎么会遵循这么简洁明了的规律呢？

抹香鲸和福卡恰面包

抹香鲸深吸一口气，轻轻一甩壮硕的尾巴，重新潜入海面以下。现在，它的体内储备了接下来45分钟内生存所需的一切，狩猎开始了。这次的猎物是一条巨型鱿鱼。鱿鱼身体柔韧，触须上长着可怕的吸盘，坚硬的喙看起来颇有几分骇人。要找到猎物，抹香鲸必须潜入大海深处阳光无法到达的黑暗世界。它下潜的深度通常是500~1000米，最深可达2千米。黑暗的深海中，抹香鲸靠高定向声呐探测猎物的踪迹，等待猎物

靠近带来的微弱回声。巨型鱿鱼仍在毫无防备地游弋，因为它听不见任何声音。

在深海中，抹香鲸最珍贵的储备就是氧气，氧气所驱动的化学反应为运动的肌肉提供了能量，抹香鲸要借此维持生命。不过，从大气中摄取的气态氧到了深海中会成为一种负担。事实上，从抹香鲸潜入水中的那一刻开始，肺里的空气就成了麻烦。每下潜1米，它承受的外部水压就多一分。氮分子和氧分子不断碰撞彼此，也碰撞着肺壁，每次碰撞都会产生一个极小的推力。在水面上，抹香鲸身体内外的推力是平衡的，但随着它不断下潜，身体承受的水压越来越大，由外向内的推力超过了由内向外的推力，于是肺壁依靠向内塌陷让内外压力重新平衡。抹香鲸的肺逐渐缩小，每个分子拥有的空间也遭到挤压，因此碰撞变得更加频繁，这意味着单位面积的肺壁将承受更多碰撞，肺内压强也随之增大，直至与外界压强相等。水下10米深处的水压相当于标准大气压的2倍。在这个深度，尽管抹香鲸还能轻松看到水面上的东西（只要它愿意去看），它的肺仍会缩小到原来的1/2。这意味着分子碰撞肺壁的次数增加了1倍。但是，鱿鱼的位置可能在水下1千米，在这个深度，抹香鲸的肺会缩小至它在水面时的1/100。

这头抹香鲸终于听到了回声，现在它必须带着缩小的肺，依靠声呐的指引在无垠的黑暗中迎接战斗。巨型鱿鱼有自己的武器，抹香鲸就算最终获胜，也可能身负重伤。要是没有肺里的氧气，它根本无法获得战斗所需的能量。

肺部缩小会带来什么问题呢？如果肺的体积变成了它在水面时的1/100，那么肺内气体的压强就会增加到标准大气压的100倍。血液中的氧气和二氧化碳在小巧的肺泡里完成交换，如果压强过大，多余的氧和氮就会在这个过程中溶解到抹香鲸的血液里。这些多余的气体可能造成严重的后果，潜水者称之为“减压病”。在抹香鲸返回水面的过程中，多余的氮气会在血液里形成气泡，破坏机体。从演化的角度来说，抹香鲸唯一的对策是从离开海面那一刻起彻底关闭肺泡。好在它可以通过血液和肌肉中额外储备的氧气获得足够的能量。抹香鲸体内的血红蛋白浓度是人类的2倍，肌红蛋白（肌肉中储存能量的蛋白质）浓度则是人类的10倍。抹香鲸会在海面上填满这个巨大的储备库。抹香鲸深潜时绝不会

动用肺里的空气，这实在太危险了。不过在水面以下，它能够利用的不仅仅是吸入的最后一口气，肌肉中储备的额外补给也会支持它的生存和战斗。

谁也没见过抹香鲸大战巨型鱿鱼。但人们在抹香鲸尸体的胃里发现过鱿鱼的喙，这是鱿鱼身上唯一不能被消化的部分。可以说，每一头抹香鲸的胃都记录着它获得胜利的次数。得胜归来的抹香鲸游向阳光，它的肺慢慢膨胀，恢复血氧供应。随着外部压强不断减小，肺的体积也会逐步回到原来的大小。

奇怪的是，在实践中，复杂的分子运动经过复杂的统计学处理后，竟能得出较为明确的结果。的确有无数分子以不同的速度碰撞了无数次，但重要的参数其实只有两个：分子运动的速度范围，以及分子碰撞容器壁的平均次数。碰撞次数和每次碰撞的强度（取决于分子的速度和质量）决定了气体压强。内部和外部气体压强的比例决定了气体体积。不过，温度带来的影响又有一点不同。



“一般来说，谁最在乎这个呢？”我们的老师亚当身穿白色束腰上衣，发福的肚子圆滚滚的，非常符合人们心目中烘焙师的形象，浓重的伦敦口音为他锦上添花。他对着一坨奇形怪状的生面团戳了戳。面团立刻吸住了老师的手指，就像一个活物——当然，面团里的确有生命。“要做出好面包，”亚当指着面团宣布，“我们需要空气。”此时此刻，我正在烘焙学校里学习制作意大利传统面包福卡恰。10岁以后我就没系过围裙，因为我已经很熟悉厨房了。然而，烤过很多面包的我，却从没见过这么奇怪的面团，真是大开眼界。

在亚当的指导下，我们开始乖乖揉面。首先将新鲜酵母和水混合起来，然后加入面粉和盐，用力揉搓出筋，谷蛋白是面包塑形的关键。在我们揉面的时候，活酵母忙着发酵糖，并且制作二氧化碳（CO2）。和我揉过的所有面团一样，福卡恰面团里其实没有外面的空气，只有许许多多的二氧化碳气泡。延展性良好的黏性面团是绝佳的生物反应堆，酵母制造的产品困在面团内部，于是面团开始“长高”。

第一阶段的发酵结束后，面团被放进橄榄油里好好洗了个澡，然后继续长高。与此同时，我们开始清洗自己的双手、操作台，还有多得惊人的各种器具。酵母的每一次发酵反应都会释放出两个二氧化碳分子，这种惰性小分子由两个氧原子和一个碳原子组成，在室温下呈气态。大量二氧化碳分子聚集形成气泡，然后它们就在这个小小的密闭空间里玩起了碰碰车。分子的每一次碰撞都可能交换能量，就像母球击中斯诺克球一样。有时候，一个分子会减速到近乎静止，另一个分子携带所有能量呼啸而去。有时候，两个分子会分享能量。每一次与富含谷蛋白的气泡壁发生碰撞时，分子都会产生一个推力，所以在这个阶段，面团里的气泡会逐渐变大。气泡内积累的分子越来越多，向外的推力也越来越强。气泡不断膨胀，直至内外气压平衡。碰撞气泡壁的二氧化碳分子有的活跃，有的迟缓。和物理学家一样，烘焙师也不在乎每个分子的具体速度，因为关键在于统计学数据所呈现的整体情况。在室温和标准大气压下，有29%的二氧化碳分子运动速度为350～500米/秒，拥有这个速度的分子具体是哪些并不重要。

亚当拍了拍手，示意我们看向他。他像魔术师一样揭开面团上的盖布，并且演示了一种我从没见过的操作。亚当把浸过油的面团拉长再叠回来，每侧各折叠一次，这是为了将外面的空气锁在皱褶之中。我不由得在脑子里大喊：这是作弊！我一直以为，面包里的气体应该是酵母释放的二氧化碳才对。我曾在日本见过一位折纸大师愤怒地批评自己的学生，说他不该用透明胶带来粘补折好的角马。在这堂烘焙课上，我感受到了同样的无名怒火。可是，既然你需要气体，弄些空气来又有什么错呢？反正等面包烤好以后，谁也不会知道它里面的气体到底来自哪里。最后，我决定服从专家的指导，老老实实叠面团。几小时后，就在我已经被发酵、折叠、浸泡橄榄油的重复流程折磨得近乎绝望的时候，充满气泡的福卡恰面团终于能进烤炉了。两种气体都将大显身手。

烤炉里的热能开始渗入面包。炉子里的气压和外面一样，但面包内部的温度却从20℃剧增到了250℃。换算成绝对温度[7]的话，那就是从293K增长到了523K，几乎翻了一番。

对气体来说，这意味着分子的运动速度会变快。这里有个违反直觉的概念：单个分子没有“温度”这一说。某种气体，或者说一团分子，是

可以有温度的，但单个分子无所谓温度。气体温度实际上是描述分子平均动能的一种方式，但说起某个具体的分子，它总在不断碰撞并且交换能量，因此它的速度也时快时慢，飘忽不定。每个分子都是一辆碰碰车，它的瞬时速度取决于得到的能量。气体分子运动速度越快，撞击气泡壁的力量就越大，产生的压强也越大。

面包进入烤炉以后，气体分子突然得到了大量热能，于是它们开始加速。分子运动的平均速度从480米/秒提升到了660米/秒，气泡壁承受的向外推力也随之增大，但外部压强却和原来一样。因此，每个气泡都会随着温度升高而增大，迫使面团向外膨胀。重点在于，空气气泡（主要成分是氮气和氧气）和二氧化碳气泡的膨胀率没有任何区别。分子的类型根本无关紧要，在压强恒定的情况下，无论是什么气体，只要温度升高1倍，其体积就会增大1倍。或者说，要在温度升高1倍的情况下保持气体体积恒定，那么它的压强会增加1倍。气体由哪些原子组成根本不重要，因为从统计学角度来说，所有气体都一样。面包烤好以后，谁也说不清哪个气泡来自二氧化碳，哪个又来自空气。包裹气泡的蛋白质和碳水化合物基质被烤熟固化，气泡完成了塑形，蓬松洁白的面包就这样做好了。

理想气体定律描述了气体的运动规律。事实证明，理想是可以实现的，这条定律完全符合现实情况。根据理想气体定律，对于一定质量的气体而言，压强和体积成反比，温度和压强成正比。在压强不变的情况下，气体体积和温度成正比。气体的种类不重要，重要的是气体分子的数量。理想气体定律为我们带来了内燃机、热气球，还有爆米花。而且它不光适用于升温时的情况，还适用于降温时的情况。

风的瀑布和发泡奶油

抵达南极是人类历史上一个重要的里程碑。伟大的极地探险家阿蒙森、斯科特、沙克尔顿等人都是传奇人物，讲述他们成败的图书记录了这个世界上最精彩的冒险故事。南极探险者需要面对的不仅仅是超乎想象的低温、食物短缺、咆哮的大海和衣物匮乏，就连伟大的理想气体定律也在跟他们作对。

南极洲腹地是一片气候干燥的高原，地面上覆盖着厚厚的冰层，但这里极少下雪。微弱的阳光几乎全都被白得刺眼的地面反射回去了，所以这里的温度最低可达-80℃。这里一片冷清。从原子层面上说，极地的大气几乎是凝滞的，因为气温太低，空气分子携带的能量少得可怜，运动速度自然也快不起来。高处的空气下沉到高原地表，又会被冰层偷走一部分热量，于是冷空气变得更冷。在同样的气压下，低温会使空气的体积缩小，变得致密。空气分子之间的距离也会拉近，运动速度更慢，更难抵挡周围空气的推力。南极的陆地海拔较高，向外延伸形成入海的斜坡，这些寒冷致密的空气会沿着斜坡不可抵挡地滑向大海，就像一道缓慢流动的气体瀑布，沿着巨大的山谷永不停歇地向着低处的大海奔流，速度越来越快。这就是南极洲的下降风，要是你想去南极点，那就得一路顶风前进。这真是大自然对探险者们开的最恶毒的玩笑。

很多地方都会出现下降风，下降风也不一定是冷风。在下降的过程中，凝滞的气体分子会有微弱的升温，这些微不足道的温暖可能造成戏剧性的结果。

2007年，我在圣迭戈的斯克里普斯海洋研究所（Scripps Institution of Oceanography）工作。作为一个北方人，我有些不习惯圣迭戈四季不变的灿烂阳光。不过，每天早上我都能在室外游泳池里游泳，所以我也没什么可抱怨的。这里的日落十分壮美。圣迭戈位于海滨，西面便是一览无余的太平洋，傍晚的天际线美得惊人。

但我仍想念四季分明的气候。圣迭戈的时间仿佛凝固了，身在此地就像生活在梦中。不过接下来，圣塔安娜风（Santa Ana winds）来了，圣迭戈温暖宜人的天气变得炎热干燥，令人浑身难受。每年秋天，圣塔安娜风总会准时到访，来自高海拔沙漠的风吹过加利福尼亚州的海岸，奔向大海。这其实也是一种下降风。但圣塔安娜风到达海面时，空气的温度比出发时要高得多。

我清晰地记得那一天，我们沿着I-5高速公路北上，远处是一条焚风奔流的巨大山谷，开车的是我当时的男朋友。我看到山谷底部云河蒸腾。“你闻到烟味儿了吗？”我问他。“别犯傻了。”他回答。

但是第二天一早我醒来时，整个世界都变了模样。肆虐的野火沿着

山谷烧到了圣迭戈北面，空气中飘着烟尘。一处篝火在炎热干燥的天气里失去了控制，火借风势，一路烧向海边。我看到的那条云河其实是野火冒出的浓烟。去上班的人要么被打发回家了，要么围在一起听广播，担心着自己的房子。我们只能等待。地平线上一片朦胧，从太空都能看到的烟云遮蔽了视线，但日落美得惊心动魄。三天后，烟雾开始上升。我认识的一些人在大火中失去了家园。所有东西上都蒙着一层灰，卫生官员建议人们一周内不要进行户外锻炼。

高原上灼热的沙漠空气经过冷却，变得致密，于是沿着山坡向下流动，就像斯科特在南极洲遇到的大风一样。然而，引发火灾的气流不仅干燥，还有很高的温度。焚风在下降的过程中为什么会变得越来越热？这些能量到底来自哪里？答案依然藏在理想气体定律之中：焚风携带的空气有着恒定的质量，而且运动速度非常快，没有时间和周围的环境交换能量。致密气流一路下降，谷底原有的空气会对它产生压力，因为谷底的气压相对较高。物质会因受压而获得能量。

你不妨想象一下：一个气球朝着一团空气分子前进，有些分子会撞上气球，然后被弹开，它们的能量显然比撞在静止平面上的分子要高。圣塔安娜风携带的空气体积会缩小，因为它遭到了周围空气的挤压。这样的挤压让运动的空气分子得到了能量，风也变得越来越热。这个过程叫作绝热增温。每年圣塔安娜风到来的时候，加利福尼亚人总会格外警惕明火。干热的焚风夺了大气中的水分，一点火星都很容易引燃野火。风的热量不光来自加州的艳阳，还来自周围空气的推挤。只要空气分子的平均速度发生变化，它的温度就会随之改变。

从罐子里挤出发泡奶油的过程则与此相反。奶油喷出的瞬间，内部的空气立即膨胀，对外界产生推力、释放能量，最后冷却下来。喷射奶油罐的喷嘴摸起来总是凉的，那是因为流经喷嘴的空气接触到大气时释放了能量。

气压只是一种参数，用于衡量微小的分子撞击某个表面的力度。正常情况下，我们不会注意到气压的存在，因为这样的撞击是均匀的。如果我举起一张纸，它并不会凭空移动，因为纸的正反两面承受的气压相等。我们每个人都时时刻刻承受着空气产生的推力，但你几乎不会感觉

到它的存在。人们花了很长时间才真正了解这种推力的大小，最后的答案有些出人意料。人们很容易认识到这个发现的重大意义，因为科学家采取了一种极为直观的演示方式。重要的科学实验通常和戏剧性的场面无关，但这个实验却拥有诸多吸引眼球的要素：马、悬念、令人震惊的结果，还有神圣罗马帝国皇帝的亲眼见证。

马德堡半球和大象的鼻子

想知道作用于某件物体的气压到底有多大，你必须抽掉物体另一面的空气，形成真空，这并不容易。公元前4世纪，亚里士多德曾宣称："自然界厌恶真空。"1000年后，这个观点仍盛行于世。创造真空似乎是个不可能的任务。但在1650年前后，奥托·冯·格里克（Otto von Guericke）发明了第一台真空泵。格里克不甘心让自己的发明埋没在无人问津的技术论文中，他是一位著名的政治家、外交家，与当时的统治者关系良好，或许正是这样的背景促使他选择了一种夺人眼球的演示方式。[8]

斐迪南三世（Ferdinand III）是神圣罗马帝国的皇帝，也是欧洲许多地区的最高统治者，1654年5月8日，他带着侍臣们来到了巴伐利亚的国会大厦外。奥托取出一个直径50厘米的空心铜球，铜球被切成了两半，接缝处光滑平整，每个半球外侧都有一个环，环上系着一根绳子，方便人们把两个半球拉住。他在铜球的接缝处涂上润滑油，将两个半球拼到一起，然后用自己发明的真空泵抽出球内的空气。[9]铜球外面没有任何固定装置，可是空气被抽出去以后，两个半球牢牢地合在了一起，就像被胶水粘起来了一样。奥托早已发现，真空泵可以帮助人们直观地看到空气的力量有多强大。数十亿微小的气体分子一刻不停地撞击铜球外表面，将两个半球推到一起，但球内却没有与之抗衡的推力。要把两个半球拉开，从外部施加的拉力必须大于空气的推力。

接下来马儿出场了。两个半球各套一组马，分别向两边用力拉。皇帝和侍臣们亲眼见证了马和看不见的空气角力。两个半球合在一起也就是一个大号水皮球的大小，使它们连接的压力全部来自空气分子的撞击，30匹马都无法将它们拉开。艰苦的拔河结束后，奥托打开阀门让空气进入球内，两个半球自己分开了。毋庸置疑，气压是这场比赛的胜利

者，它的强大超乎所有人的想象。如果你把这样的一个球完全抽空然后垂直悬挂起来，从理论上说，它可以承受2000千克的重物，两个半球不会因此分开。要知道，这差不多等于一头犀牛的重量。也就是说，如果你在地上画个直径50厘米的圈，那么空气向这块小小的地板施加的压力就相当于一头犀牛站在上面。看不见的渺小分子撞击我们的力度竟然有这么大。奥托为不同的观众演示了很多次这样的半球实验，后来人们将这种铜球命名为“马德堡半球”，因为马德堡是奥托的家乡。

奥托的实验之所以闻名于世，也是因为有人留下了记录。加斯帕尔·肖特（Gaspar Schott）在1657年出版的一本书里提到了马德堡半球实验，奥托的成就从此进入主流科学界的视野。有记载称，奥托的真空泵启发了罗伯特·波义耳和罗伯特·胡克后来的气压实验。

你可以自己做个真空实验，不需要马，也不需要皇帝。请找一块能够盖住玻璃杯口的方形厚卡纸。为防万一，这个实验最好在水槽里完成。在玻璃杯里装满水，把卡纸放在杯口边缘，然后小心地平推过去，直至卡纸完全盖住杯口，注意不要留下任何气泡。接下来你可以把玻璃杯倒过来，然后松开手。现在卡纸承受着整杯水的重量，却不会掉下来。这是因为下方的空气分子不断撞击卡纸，产生了向上的推力。这样的力量可以轻而易举地托起一杯水。

空气分子的撞击不光能固定物体，也能推动物体，其他动物早就发现了这个秘密，大象就是利用气压的专家。

非洲象体形庞大，它们优雅漫步的身影常常出现在干燥多尘的热带草原上。象群的核心成员通常是几头母象。年高德劭的族长带领象群寻找水和食物，它们根据自己对地形的记忆做出决策。对于这些动物来说，空有大块头是无法生存的。大象的身体沉重而笨拙，为了弥补这一点，它们拥有了动物王国里最精密、最灵敏的工具：象鼻。象群行进途中，每一头大象都会用这种奇特的装备不断探索周围的世界。象鼻能够传达信息、进行嗅探、辅助进食，还能喷水。

无论从哪个方面来看，象鼻都很奇妙。组成象鼻的肌肉相互联系、协同工作，能够灵活自如地弯曲扭转，还能抓取物体。光是这一点就已经足够实用，贯穿象鼻的两个鼻孔又为它锦上添花。鼻孔从象鼻末端通

往大象的肺部，有趣的事情就发生在这里。

象群来到水边。和其他地方一样，这里看似平静的空气在一刻不停地运动着，无数分子撞击着大象皱巴巴的灰色皮肤，也撞击着地面和水面。族长走在象群的最前面，它甩着鼻子慢吞吞地走进池塘，沉重的脚步激起阵阵涟漪。它把鼻子伸进水里，闭紧嘴巴，胸部周围的大块肌肉开始收缩，使胸腔扩张。随着肺部的膨胀，肺里需要更多空气分子去占领新的空间。这意味着，在接触凉爽池水的象鼻末端，鼻孔里撞击水面的空气分子会变少。尽管空气分子运动的速度不变，母象肺内气压仍会下降。在外部气压与肺内气压的推挤赛中，外压获得了胜利。内压小于外压，所以外压推动水进入象鼻。不过，等到水占据了一部分空间后，母象体内的空气分子又会恢复原来的密度，象鼻里的水柱也不再上升。

你用鼻子喝水会呛到，大象也一样。在鼻子里存了大约8升水以后，族长的胸腔就会停止扩张。接下来，它弯起鼻子对准自己的嘴，肌肉挤压胸腔，让肺变小。体内的空气分子受到挤压，象鼻内部的水面就会遭到更多撞击。内压和外压的战斗倒过来重演一遍，象鼻里的水被挤到嘴里。族长通过控制肺的容量来调节内外压差。只要闭上嘴巴，鼻孔就成了空气出入身体的唯一通道，这样它就能够随心所欲地用鼻子吸入或喷出东西了。象鼻和肺是大象操控空气的工具，大象借助空气来喷水，而不是单纯依靠自己的力量。

我们用吸管喝水也是基于同样的原理。[10]肺部扩张，肺内空气变得相对稀薄，在吸管里对水面施压的分子就会变少，于是外部气压推动管内液面上升。这个动作我们称之为“吸”，但实际上我们并没有对水施力，吸管外的空气替我们推动了吸管里的水。只要一边空气分子撞击的力度大于另一边，就连沉重的水都可以被推动。

象鼻和吸管利用气压吸水的能力也有限度。两侧的压差越大，一侧对另一侧的推力也越大。但你能够用吸管制造的压差顶多就是一个标准大气压的大小。最完美的真空泵也只能把水抽到10.2米的高度，因为我们周围的空气只能提供这么多推力。所以，为了最大限度地利用气体分子提供推力，你得设法让它们在更高的压强下工作。大气就能提供可观的推力，但气体在高温高压下产生的推力更加惊人。只要气体分子的数

量够多，速度够快，撞击频率够高，它们就足以推动人类文明。

古老的蒸汽机和用来送信的火箭

蒸汽火车是钢铁制造的巨龙，这头怪兽呼哧呼哧地喘着粗气，力气大得吓人。不到100年前，钢铁巨龙在大陆上飞驰，将工业产品和社会所需的其他物资运到诸多国家的各个地区，将旅客送往远方。蒸汽火车外表平平无奇，还会造成不可忽视的噪声和污染，但它们仍是工程学的杰作。就算这些巨龙已经过时，我们仍舍不得让它们彻底死去。志愿者和爱好者的热忱让一些蒸汽火车存留至今。我在英国北部长大，我的整个童年都沉浸在工业革命史中，对磨坊、运河、工厂，还有最重要的蒸汽机无比熟悉。现在我住在伦敦，这段过往渐渐淡去，但和妹妹一起乘坐蓝铃铁路蒸汽火车的旅程唤醒了我的记忆。

那是个寒冷的冬天，在这样的日子里，乘坐蒸汽火车奔向热茶和司康饼简直是最完美的旅程。出发前，我们没在站台上逗留太久，不过到达谢菲尔德公园后，我们离开火车，在外面待了一会儿。来来往往的人们动作迟缓，却井然有序。与庞大的钢铁巨兽相比，人类看起来是那么渺小。你很容易认出维护机车的工作人员，他们穿着蓝色制服，戴着有檐帽，举手投足间活力十足，有的工人留着胡子，不干活的时候，他们总喜欢在某个地方靠着。而且正如我妹妹所说，这些人里名叫“戴夫”的多得惊人。

蒸汽发动机的妙处在于，它背后的原理非常简单，产生的力量却是那么强大，我们需要去激发它、驯服它、培养它。蒸汽发动机和维护它的人类是密不可分的。

站在地面上仰望巨大的黑色发动机，你很难想象它其实就是一个带轮子的火炉，上面烧着一大壶水。一位戴夫邀请我们去驾驶室里看看。我们爬上发动机背面的梯子，发现眼前黑乎乎的房间里到处都是黄铜把手、表盘和管子，我还看到了两个白色搪瓷马克杯和塞在管子后面的三明治。不过驾驶室最有趣的地方在于，你可以直接看到这头钢铁怪兽肚子里面的东西。蒸汽发动机的中央是一座巨大的炉子，炉膛里炽烈燃烧的煤发出明亮的黄光。烧火工递给我一把铲子，让我给发动机“喂料”，

我乖乖从后面的补给车里挖了一铲子煤，送进那张炽热的大嘴。发动机很饿。要跑完这条18千米的路线，它得烧掉500千克煤。这半吨固体黑金会转化成二氧化碳和水分子的混合气体，燃烧释放的巨大能量将它们变得滚烫。这是蒸汽火车能量转化过程的第一步。

蒸汽发动机最引人注目的部件无疑是机舱与炉子之间的长圆筒，它是发动机的主体。我从没认真想过圆筒里到底有什么东西，其实那里面填满了管子。火炉产生的热气通过这些管子传遍整个发动机，从本质上说，它是蒸汽火车的“水壶”。管子周围的大部分空间充满了水，吸收了管内气体的热量后，灼热的水分子蒸发成气体，在发动机顶部以极快的速度左冲右突。这就是蒸汽发动机的工作本质：用炉子和水壶制造出大量灼热的水蒸气。这头巨龙不会喷火，它喷出的是数以亿计携带能量的分子，但这些高速运动的分子却被困在发动机内部的狭小空间里。“水壶”顶部的气体温度约为180℃，产生的压强高达10个标准大气压。这些分子狂暴地敲打着发动机壁，但只有在人类需要它们干活的时候，它们才能出去。

我们离开驾驶室，走到机车前方。高耸的发动机、半吨煤、巨型水壶和所有维护人员——我们刚才看到的一切都服务于眼前这个东西：两个带活塞的圆筒，每个直径约50厘米，长约70厘米。它位于机车前方，和整个钢铁巨龙比起来是那么渺小，但却是真正的核心所在。灼热的高压蒸汽进入其中一个圆筒，活塞另一面的普通空气无法抵御巨龙喷出的10倍气压，分子的撞击力推动活塞沿着圆筒移动，伴着令人心满意足的“哐哧”声，灼热的气体最终会释放到外面的大气之中。蒸汽发动机熟悉的“哐哧”声正是源于这里，这是完成任务的水蒸气释放到大气中时发出的声音。活塞推动车轮沿铁轨前进，车头拖着车厢开动了。我们知道，维持蒸汽发动机运转需要消耗大量煤，但很少有人关心蒸汽火车跑一趟需要多少水。500千克燃煤会将4500升水转化成蒸汽，这些蒸汽推动活塞，然后伴随着每一次的“哐哧”声散逸到大气中。[11]

参观结束后，我们依依不舍地离开发动机，回到车厢里，让蒸汽火车把我们送回家。返程途中，一切似乎都变得不一样了。看到窗外白茫茫的一片，我不由得想起水蒸气为我们的旅途做出的贡献；想到刚才在驾驶室里看到的景象，发动机巨大的轰隆声似乎也不那么吵了。要是有

人能用玻璃做一台蒸汽机车该有多好，这样所有人都能看到这头巨兽是怎么工作的。

利用气体分子的推力是19世纪早期蒸汽革命的核心。你只需让某个表面两侧的气体产生压力差，这样的推力能顶起厨房里的锅盖，也能用来运送食物、燃料和旅客，两种现象的基本原理完全相同。现在，蒸汽发动机已经过时，但我们仍在利用气压差带来的推力。从技术角度来说，蒸汽发动机属于“外燃机”，因为炉子和水壶彼此独立，互不相干。而在汽车发动机里，燃烧发生在圆筒内部，汽油就在活塞旁边燃烧，产生的高温气体直接推动活塞。这类发动机被称为“内燃机”。开车或坐公交车的时候，请你记得，推动你的是气体分子。

气压和体积的关系非常容易演示，你只需要一个广口瓶和一个剥了壳的熟鸡蛋。瓶口的直径要比鸡蛋小一点点，让鸡蛋能够安稳地放在瓶口上，不会掉进去。请点燃几张纸扔进瓶子，让燃烧持续几秒，然后把鸡蛋放在瓶口。片刻之后，你会看到鸡蛋慢慢地挤进了瓶子里。这下麻烦了，该怎么把瓶子里的鸡蛋弄出来呢？把瓶子倒过来，让鸡蛋从里面堵住瓶口，然后用热水冲一会儿瓶子，鸡蛋自然就会掉下来。

这个游戏的奥秘在于，瓶内气体的质量是固定的，通过鸡蛋你可以看出是瓶子里的气压更高还是外面的气压更高。鸡蛋在瓶口，那么瓶内气体的体积是固定的。这时候如果用火加热瓶子，那么瓶内气压就会升高，会有空气从鸡蛋周围冒出来。等到气体冷却下来，瓶内气压也会随之降低，所以鸡蛋会挤进瓶子。这时候，外部气压大于瓶内气压。容器还是这个容器，你可以反复冷却、加热空气，让鸡蛋钻进钻出。

蒸汽发动机制造的高压是稳定可控的，它能为活塞和车轮提供理想的动力。但事情并未到此为止。为何不简化从气体到轮子的过程，以此节约能量呢？为何不用高温高压的气体直接驱动车辆？枪炮和烟花就是这类思路的产物。众所周知，在发明之初，这些东西的稳定性都很差，到了20世纪初，人类的技术和追求都有了长足的进步，火箭才终于被发明出来，它采取的正是最直接的推进方式。

第一次世界大战之前，火箭技术还不够可靠，在20世纪30年代，发射出去的火箭很可能飞往正确的方向，却不大可能炸死人，至少多数情

况是这样。和很多新技术一样，火箭刚刚发明的时候，人们根本不知道它能用来干什么。在热情的驱使下，富有创造力的人类为它想出了一个听起来很时髦却破坏力十足的新用途：送信。

在欧洲，人们真的试过用火箭送信，这完全是因为格哈德·楚克尔（Gerhard Zucker）的努力。当时捣鼓火箭的发明家有好几位，但面对接踵而来的挫折与失败，只有楚克尔以近乎偏执的坚持和绝不放弃的乐观走在了所有人的前面。这位德国的年轻人痴迷于火箭，可是军方对他的发明毫无兴趣，所以他转而在民用领域探索前景。在他看来，用火箭送信正是全世界人民翘首以盼的，因为火箭速度够快，可以跨越大洋，而且闪烁着创造力的光辉。德国人受够了他失败的早期试验，于是楚克尔来到了英国。在这里，他获得了集邮爱好者的友谊和支持，集邮者们欢迎新邮戳和新的邮递系统。在汉普郡进行了一次小规模试验后，1934年7月，楚克尔动身前往苏格兰，试图在斯卡普岛和哈里斯岛进行火箭送信试验。

楚克尔的火箭还不太成熟。它的主体是一个长约1米的巨大金属圆筒，圆筒内有一根装满了炸药粉的细铜管，喷嘴位于圆筒底部。信件就塞在铜管外壁和圆筒内壁之间。火箭顶端是个带弹簧的尖顶，楚克尔希望它能缓冲火箭着陆的冲击力。更可爱的是，考虑到炸药可能引燃信件，楚克尔还在铜管外添加了保护层，他在草图上是这样标注的：“用石棉包裹火药筒，以防毁坏邮件。”这枚火箭被安放在一台支架上，斜斜指向天空。发射的时候，电池会引燃炸药，产生大量高压热气。高速运动的气体分子猛烈撞击火箭顶端，推动它向前飞行，但火箭尾端不存在等量的推力，废气只是通过喷嘴直接排放到大气中。推力的失衡使火箭疾速向前飞行，炸药会持续燃烧几秒，足以将火箭推到高空，让它飞越两座岛之间的海峡。至于火箭的落点和着陆方式，他似乎没怎么考虑，不过楚克尔之所以会在苏格兰四面环海的偏远地区进行这次试验，应该也有这方面的原因。

为了完成试验，楚克尔征集了1200封信件，每封信上都盖了特制的邮戳，上面写着“西部群岛火箭邮政”。他把塞得满满当当的火箭放到支架上，围观的人群屏息静待，英国广播公司的摄像机开拍，激动人心的时刻来了。

发射键被按下的瞬间，电池点燃了炸药。剧烈的燃烧在铜管内制造出灼热的混合气体，载满能量的分子撞击火箭顶壁，推动火箭离开支架高速升空。不过短短几秒钟后，伴随着一声巨大的闷响，火箭消失在一团浓烟中。烟雾散尽后，数以百计的信件从半空中飘落。石棉层圆满地完成了任务，火箭却彻底被毁。高压热气很难控制，携带大量能量的分子炸掉了火箭的外壳。楚克尔觉得是炸药筒不够好，他开始回收信件，准备进行第二次试验。

几天后，从上次事故中抢救回来的793封信和142封新邮件被塞进了第二枚火箭。这次楚克尔选择在哈里斯岛发射，终点是斯卡普岛。不过他还是差了点运气。第二枚火箭直接在发射台上爆炸了，这次的声音更加响亮。残存的信件再次被收集起来，由常规邮政系统送往收件人手中，只有烧焦的毛边暗示着它们不同寻常的历程。火箭试验遭到了公众的抛弃。但接下来的几年里，楚克尔仍锲而不舍，他总是相信下次一定会成功，但成功始终没有到来——至少他从未用火箭成功送出过信件。[12]楚克尔是个执着于探索的人。我们可以说他没有在正确的时间和地点想出正确的主意。要是天时地利人和俱全，人们就会将他尊为天才。小型火箭可靠性低、精度不高，要说送信，它的确比不上机动化运输系统和电报。从某种角度来说，楚克尔是对的：以高压热气为推进剂，完成A点到B点的运输任务，这个想法潜力无限。可最后是其他人为这个原理找到了真正的舞台，解决了实际问题，最后大获成功。德国的V1和V2火箭在第二次世界大战中崭露头角，火箭研发纳入军方项目，民用太空项目也逐渐兴起。

现在，我们早已熟悉了巨大的火箭搭载设备和人员飞往国际空间站或者将卫星送上太空的画面。火箭的确非常强大，现代的控制系统让它们变得安全可靠，这是人类了不起的成就。但是，无论是“土星5号”（Saturn　V）、“联盟号”（Soyuz）、“阿丽亚娜系列”（Ariane）还是“猎鹰9号”（Falcon　9），所有火箭背后的基本原理都和楚克尔简陋的邮政火箭一模一样。只要能在足够短的时间内制造出足够多的高压热气，你就可以利用数以亿计的分子累积起来的强大撞击力。“联盟号”火箭第一级的飞行气压大约是标准大气压的60倍，所以它产生的推力也是普通空气推力的60倍。不过，这两种推力本质上完全相同，都是由分子

撞击物体而产生的。只要分子够多，速度够快，撞击频率够高，这样的推力就能把人类送上月球。永远不要低估那些小得看不见的东西！

能量和天气

气体分子总是和我们形影不离。地球大气时刻包裹着我们，撞击着我们，推动着我们，也维持着我们的生命。大气的有趣之处在于，它不是静止的，它总在不停地流动变化。空气在我们眼里是隐形的，若非如此，我们就会看到大量空气不断升温或是冷却，扩张或是收缩，永不停歇地运动。和气体分子一样，大气的运动也遵循气体定律。就算离开了抹香鲸的肺和蒸汽发动机，空气中的分子仍在一刻不停地彼此推挤。大气在不断运动，根据环境的变化调节自己。人们看不到大气变化的细节，却给大气运动带来的结果起了个名字：天气。

广袤的平原是观察风暴的最佳地点。风暴来临的前一天，天气晴朗，天空蓝得像是永远不会变一样。看不见的空气分子聚集在地面附近，向着高处扩散，它们一刻不停地推挤、碰撞、流动、调整。温度变化促使空气不断地从高压区向低压区分流。不过，这一切进行得缓慢而平和，你很难想象这些分子携带着多么巨大的能量。

风暴来临之日的凌晨和前一天别无二致，但天空更加清澈，所以地面升温的速度也大大加快了。空气分子吸收了部分热量，运动速度越来越快。到了午后，天空中已经形成了一道厚厚的云壁，它不断移动、扩张，直至遮蔽整个地平线。能量在流动。压差推动气体形成的厚墙碾过这片平原。由于这堵巨墙并不稳定，戏剧性的场面出现了。气体分子彼此推挤，但它们没有足够的时间来重新达到平衡。与此同时，大量能量不断流动，情况瞬息万变。被地面加热的空气向上推挤云层，在气墙上方顶起一座座高塔。

雷雨云终于来到了我们头顶，低悬的黑色云层遮蔽了一望无际的湛蓝。头顶不时传来沉闷的雷鸣，我们看不到空气分子，只看到乌云翻涌如潮。云层中的气团彼此冲撞推挤，巨大的压差让这个再调整的过程变得迅猛狂暴。能量在空气分子之间交换，雨滴逐渐形成、变大，第一批硕大的雨滴开始坠落。强风从我们身边呼啸而过，那是空气分子在地面

上飞奔。

巨大的雷雨云让我们看到了湛蓝的天空中积聚着多少能量，但这看似极端的现象不过是空气分子的推挤和碰撞在宏观层面上留下的痕迹，分子层面发生的事情比这还要激烈得多。空气分子会从阳光中吸收能量，再释放给海水，从云层的冷凝中吸收能量，再辐射到太空中。无论如何，它们总在按照理想气体定律一刻不停地调整自己。旋转的地球拥有斑斓的色彩和起伏不定的表面，使得这种调整更加复杂，云、微粒和某些气体的存在又带来了额外的变数。天气预报实际上就是追踪头顶天空中的战斗，挑选出对地面上的我们影响最大的结果。不过从本质上说，大象用鼻子喝水、火箭一飞冲天，还有蒸汽推动火车也遵循同样的原理，这些现象都是气体定律在现实中的投影。爆米花和天气之间也有这种隐秘而深刻的关联。

第2章

有升必有落

- 重力 -

让葡萄干跳舞

好奇心流淌在我的家族血液中。我的家人总是乐于接触和探索新事物，不厌其烦地尝试新东西。所以，哪怕我在全家聚餐时突然跑进厨房翻出一瓶柠檬汽水和一把葡萄干开始捣鼓，他们也丝毫不会大惊小怪。那是个美丽的夏日，我母亲家的花园里坐着全家人，包括我的妹妹、姨妈、祖母和父母。我找出一瓶2升装的廉价柠檬汽水，撕掉标签，然后把那个塑料瓶放到桌子中央。面对我的疯狂之举，他们谁都没有说话，但我知道，大家都在关注我的一举一动。于是我打开瓶盖，往瓶子里加了整整一把葡萄干。柠檬汽水里升起了泡沫，等气泡散尽，我们发现葡萄干在水中舞动。我本来觉得这个小把戏最多能吸引大家一两分钟的注意力，但祖母和父亲却一直盯着它看。塑料瓶仿佛变成了一盏熔岩灯，葡萄干从瓶底浮到水面上，然后又沉下去，周而复始。它们在瓶子里打着旋儿互相碰撞，十分热闹。

一只麻雀飞了过来，它一边啄着桌上的面包屑，一边好奇地看了瓶子一眼。桌子对面的父亲也紧盯着瓶子，眼神里同样充满好奇。“放其他东西进去也行吧？”他问道。

答案是肯定的，而且理由非常充分。瓶盖打开之前，瓶内气压远高于外部气压。就在你拧开瓶盖的瞬间，瓶内气压下降了。柠檬汽水里溶解着大量气体，高压迫使它们停留在水中；但是突然之间，所有气体有了个出口。问题在于，它们需要一条疏散路线。制造新气泡非常困难，所以这些气体分子只能加入已有的气泡。葡萄干来得正合适，它的表面满是V形褶皱，这是个有利因素，因为柠檬汽水无法彻底填充缝隙里的空间。沉到水底的葡萄干，每一条皱褶里都藏着气泡的雏形——一小团气体。这就是你需要葡萄干（或者其他密度略大于水的皱巴巴的小东

西）的原因。柠檬汽水里的气体涌进这些还未成形的气泡，给葡萄干穿上一层气体组成的救生衣。葡萄干本身的密度比水大，所以重力会拖着它沉到水底；但气泡成形后，葡萄干和这些气泡加在一起的整体密度就变小了，于是它开始上浮。到达水面后，气泡破裂散逸，于是你看到葡萄干沉了下去。葡萄干被气体托出水面，因为失去救生衣而下沉，这样的过程周而复始，直至柠檬汽水里多余的二氧化碳耗尽。

在桌子中央放了半小时以后，瓶子里令人眼花缭乱的现象终于渐渐平息，只是偶尔还有一粒葡萄干无精打采地缓缓沉浮，柠檬汽水也蒙上了一层黯淡的黄色。浮力带来的盛大演出已经谢幕，剩下的一大瓶液体看起来就像泡着死苍蝇的尿样。

试试看吧。如果你能找到一小把葡萄干，那么这套小把戏很适合在在聚会时活跃气氛。关键在于，气泡和葡萄干融合成了一个整体，它们一起运动。裹在葡萄干上的气泡几乎没什么重量，却能大大扩展它们所占的体积。物体的密度等于质量除它占据的空间，所以葡萄干和气泡组成的这个整体，其密度小于葡萄干本身。重力以拉力的形式作用于物体，密度小的东西重力也更小。正因如此，某些物体能浮起来——漂浮只是重力引发的一种分层现象。重力将密度大的液体向下拉扯，如果浸泡在液体内的物体密度相对较小，它就会上浮。所以我们说，比液体密度小的物体会漂浮在液面上。

充满空气的空间可以帮助调节物体的相对密度和漂浮状态。众所周知，“永不沉没”的“泰坦尼克号”就在底舱中设计了巨大的防水隔间，它们的作用类似葡萄干上的气泡：充满空气的隔间为这艘巨轮提供了更多浮力，让它能浮在海面上。结果“泰坦尼克号”撞上了冰山，隔间的密封性遭到破坏，水灌满了底舱，就像葡萄干上的气泡散逸到空气中。和失去了救生衣的葡萄干一样，“泰坦尼克号”只能无奈地沉入深海。[13]

我们见惯了物体的沉浮，却很少会想到物体有重力才有沉浮。这种亘古长存的力量占据着生命的舞台，时时刻刻提醒我们哪边是“下”。重力的作用大得不可思议，它将所有物体固定在地面上，让一切看起来井然有序。与此同时，重力产生的效果也是最直观的。力很奇怪——你看不见它，也很难弄清它的作用。但重力一直在那里，大小不变（至少在

地表是这样），方向恒定。如果你想深入了解力，重力是理想的启蒙老师。先了解一下坠落现象吧，这是最好的入门方式，不是吗？

空中坠落和海上摇摆

跳板跳水和高台跳水带来的感觉介于极度的自由和彻底的疯狂之间。离开跳板的瞬间，你完全感觉不到重力的存在。当然，重力并没有消失，但在那一刻，它是作用在你身上的唯一的力，没有任何力与它抗衡。这时，你在旋转中感觉自己就像一个完全不受外力的物体，仿佛飘浮在太空中，你将体会到极度的自由。但世上没有免费的午餐，一两秒后你就会到达水面，麻烦也跟着来了。你有两条路可走：要么用手或者脚开辟一条小小的通道，让身体其余部分能够优雅地滑入水中，最大限度地压制水花；要么张开四肢，任由自己的肚子或者背部迎接冲击，激起巨大的水花。当然，第二种方式会很疼。

二十多岁时我做过几年跳板跳水选手和教练，但我讨厌高台跳水。跳板富有弹性，而且它距离水面的高度只有1～3米，感觉有点像蹦床，只是着陆更加平缓。高台却是坚硬的，不同高台距离水面的高度分为5米、7.5米甚至10米。我常去训练的那个游泳馆只有5米的高台，但我依然想方设法逃避高台跳水。

站在5米的高台上，脚下的水面看起来非常遥远。游泳池底总有细碎的泡泡冒上来，所以就算池水纹丝不动，你也能清晰地看到水面的位置。最基础的热身动作是向前正跳——看到这个名字，你不难想象出相应的动作。跳水者站在跳台末端，双臂伸直紧锁在头顶，同时向前弯腰，整个身体呈L形，保证上半身与下半身形成直角。现在眼前的高度看起来似乎没那么吓人了，因为弯下腰以后，你的头离水面近了一点。然后，你踮起脚纵身一跃，就在这个瞬间，你自由了。天地间只剩下你和这颗重达6×10^{24}千克的星球，重力是你们之间唯一的联系。根据宇宙的法则，这意味着你们正在互相拉扯。

和其他所有力一样，重力会改变你的速度，它会带来加速度。这就是著名的牛顿第二定律[14]：作用于你的合力会改变你的速度。起跳前，你处于静止状态，起跳的瞬间，你动了起来。加速度的有趣之处在

于，它衡量的是物体每秒的速度变化。从起跳到下落1米，你需要花费相对较长的时间（0.45秒）。在下一个1米，你的下落会花费更少的时间，也正因如此，这个过程中可以用来加速的时间比上一个1米短暂。下落1米时你的速度是4.2米/秒，下落2米以后，你的速度也只达到了6.2米/秒。

因此，在跳水的过程中，你要花大部分时间待在最糟的地方：远离水面的高空。举个例子：从5米高台跳水的时候，前一半的时间里你只能下降1.22米，但接下来就很快了，整个5米的下落过程在1秒内就能完成，最终你的速度将达到9.9米/秒。你伸展身体扎向水面，期待着没有水花的完美入水。

比赛前夕，无论来到哪个游泳池，队里的其他人都会争先恐后地抢占更高的跳台，我却不会。我觉得在空中停留的时间越长，出错的可能性就越大。但这个想法其实不太站得住脚，因为你的运动速度太快，额外的距离根本不会增加多少速度。举例来说，下降5米需要1秒，下降10米只需1.4秒，虽然你的运动距离变成了原来的2倍，但速度却只会增加40%。我很清楚这一点。但在4年的跳水生涯中，我从没跳过超过5米的高度。我不恐高，只是害怕最后的冲击。重力加速的时间越长，最后减速的过程就越让人不适。如果你也有不小心摔坏手机的经历，你肯定明白让重力做主有时候不是什么好事。坠落的距离越长，物体获得的加速度也越大，不过事情也有例外。

在地球上，重力的作用是有限制的。因为作用于你的力不止重力一种，最终的加速度取决于所有力的合力。速度变快了，你需要在单位时间内推开的空气也会变多，这些空气会阻挡你前进，部分抵消重力的加速效果，因为它的方向与重力完全相反。到了某个时刻，重力与阻力相平衡，你的运动速度就会定下来不再变快。以树叶、气球和降落伞为例，这些东西的重力很微弱，相比之下，作用于它们的空气阻力相当可观，所以这些物体在下落速度相对较小的时候就会达到受力平衡。如果是人的话，想在地面附近让重力与空气阻力相平衡，你的速度很可能要高达190千米/小时才行。悲伤的是，坠落的人在低速下受到的空气阻力相当微弱，直到现在，这样的力量也无法让我安心地跳下10米的高台。

●

我主要研究海面附近的物理学现象。我是实验物理学家，测量海天之间这片美丽而混乱的空间中发生的事情，这是我工作的一部分。我经常需要在科考船上工作好几个星期，在海面上漂浮的科考船就像一座功能齐全的移动科学村。在船上生活的问题在于，这里的重力环境和你以前习惯的大相径庭。“下”变成了一个不确定的概念。有时候物体坠落的方向和速度与陆地上相同，有时候却完全不一样。要是桌子上的东西没有固定，你就总有些提心吊胆，因为谁也无法确定它会一直停留在原处。海上生活充斥着橡皮筋、线、绳子、黏性防滑垫和上锁的抽屉。变幻莫测的力随时可能把各种物品甩向四面八方，就像喜欢恶作剧的科学幽灵；在这种情况下，你需要这些小玩意儿帮助维持生活的秩序。

我研究的是风暴中破碎的海浪产生的气泡，所以我经常在恶劣的天气下出海几个月。实际上我喜欢出海，因为我很快适应了海上的生活。这样的经历也让我深刻地认识到，我们平时对重力有多么熟视无睹。

在某艘南极科考船上，乘务长怀着近乎偏执的热情每周让我们做三次循环训练。我们聚集在大船中央一个空旷的铁壁船舱里，乖乖地跟着指挥蹦蹦跳跳，每次持续1小时。这可能是我做过的最锻炼人的循环训练，因为永远不知道下一秒哪里会冒出一个力需要去克服。你可能觉得前几个仰卧起坐轻松得不像话，那是因为船身正在向下倾斜，这有效地抵消了重力。船驶到浪谷的时候，你简直感觉飘飘欲仙。然而就在下一个瞬间，重力陡然增加了50%，你觉得自己像是被橡皮筋紧紧地捆在了地面上，你必须调动肚子上的所有肌肉才能勉强把身体拉起来。几个仰卧起坐以后，重力又会再次消失。需要跳跃的运动感觉更糟，因为你永远不知道哪边才是地板。训练终于结束了，可是在洗澡的时候，你还得在小隔间里追逐花洒喷出的水流，因为船身在摇晃，你根本不知道它下一秒会喷向哪里。

当然，重力是无辜的。它一视同仁地作用于船上的所有东西，将每一个物体拉往地心的方向。但你总是在需要对抗重力加速度的时候感受到重力的作用。海上科考船这个铁盒子被大自然玩弄于股掌之中。在这里生活，你周围的一切都在加速，你的身体也无从分辨罪魁祸首到底是

重力加速度还是其他力带来的加速度。所以，无论这些力来自哪里，所有力抵消或是汇合之后的结果，才是你感觉到的重力。同样，在电梯刚刚启动和即将停止的时候——在电梯加速和减速的过程中——你也会产生一种奇怪的感觉。身体无法分辨电梯带来的加速度和重力造成的加速度，所以你会感觉重力对你的作用在变化。在那短短的几分之一秒内，你体验到了生活在另一颗重力不同的星球上是什么感觉。[15]

幸运的是，大部分时间我们不用为这些复杂的事情操心。在日常生活中，重力恒定不变，永远指向地心。所有物体都会向“下”坠落，就连植物都知道这个。

我的母亲是一位勤劳的园丁，所以我在成长过程中，有很多机会参与播种和锄草，我还会翻肥堆，会对着恶心的鼻涕虫不由自主地皱起鼻子。我还记得，种子萌芽让幼时的我惊叹不已，因为它们能把上和下分得清清楚楚。种荚在黑暗的泥土中悄然张开，根须向下伸展，初生的幼芽努力向上冒出头来。只要拔出一棵刚刚发芽的幼苗，你就能清晰地看到，它毫不犹豫地朝这两个方向生长，不需丝毫探索。根笔直向下，芽挺拔向上。种子怎么知道方向呢？长大一点以后，我找到了答案。真相其实很简单，种子里有一种特殊的平衡细胞，这就像植物版的微缩雪景球。每个平衡细胞里都有一些特殊的淀粉颗粒，这些颗粒的密度大于细胞内的其他物质，所以它们总会沉到细胞底部。蛋白质的网络能够感知这些颗粒的位置，所以种子和幼苗知道哪边是上。下次播种的时候，你可以把种子翻来倒去，想象一下你的动作将如何影响种子里的雪景球；不必在乎种子撒下去的角度，它们会自己解决这个问题。

重力是一种非常有用的工具。铅垂线和水准仪廉价而精准。我们都知道哪边是“下”，但是，既然所有物体之间都有引力，那远处的山岂不是也在拉扯我？为什么地心引力这么独特？

我热爱海滨，原因有很多（浪花、泡沫、日落、海边的轻风），但其中最重要的是，辽阔的大海可以带来弥足珍贵的自由感。在加州工作的时候，我跟别人合住在一栋小房子里，离海滩近得能听到夜晚的涛声。后院有一棵橘子树，我可以坐在门廊下，静观熙来攘往的人群。忙碌的一天结束后，我可以走到公路尽头，坐在光滑而沧桑的石头上遥望

太平洋，这真是再奢侈不过的享受。

幼时的我也曾在英国的海边玩耍，但那时候我总忙着寻找鱼儿和鸟，或是惊叹于海浪的壮观。但在圣迭戈看海的时候，我想到的是我们这颗星球。太平洋如此广阔，它在赤道上的跨度足足占据了整个地球周长的1/3。望着远方的日落，我想着脚下这个巨大的岩石球，阿拉斯加和北极在我右侧的远方，脚下的安第斯山脉向左一路延伸到南极洲。我险些迷失在头脑中的画卷里，在那个瞬间，我仿佛一念千里，亲身来到了那些地方。它们都在吸引我，我也在吸引它们。每一个质点都在吸引其他质点，万有引力其实是一种很小的力，就连孩子都能轻松对抗整颗行星产生的引力。但无论如何，这些弱小的吸引力依然存在。我们体验到的重力由无数微弱的力汇集而成。

1687年，伟大的科学家艾萨克·牛顿在《自然哲学的数学原理》（Philosophiae Naturalis Principia Mathematica）中首次提出了万有引力定律。这条定律指出，两个物体之间的引力与距离的平方成反比。根据这一点，牛顿证明了如果将一颗行星产生的所有引力汇总到一起，许多侧向力会相互抵消，最后只留下一个向下的力，它指向行星正中央，与行星质量及被拉扯物体的质量成正比。如果一座山和你的距离拉长至原来的2倍，那它对你的引力就会变成原来的1/4。所以物体离你越远，对你的影响就越小，尽管影响依然存在。我坐在海滨看落日时，阿拉斯加向我施加了一个向北的引力，与此同时，安第斯山向我施加了一个向南的引力。但这两股力相互抵消，剩下的就是向下的重力。

所以，此时此刻，尽管每一个人都会同时受到喜马拉雅山、悉尼歌剧院、地核和无数海螺的引力，但我们无须深究所有细节，化繁为简就是最便捷的工具。要计算地球对我的引力，我只需要知道地心和我的距离以及整颗行星的质量。牛顿这一理论的美妙之处在于，它简洁、明确、有效。

不过，力的确很奇怪。牛顿对引力的解释固然相当巧妙，却有一个极大的缺陷：他没有揭示引力背后的机制。地球的引力让苹果落地[16]——这样的断言简单而直接，但引力从何而来？难道有我们看不见的绳子或者精灵？直到爱因斯坦提出广义相对论，这个问题才有了比较令人

满意的答案，但在此之前的230年里，牛顿的引力模型得到了广泛的接受，而且一直应用至今，因为它的确非常有效。

厨房秤、伦敦塔桥和霸王龙

你看不到力，但几乎每个厨房里都有测量力的设备。烹饪（尤其是烘焙）需要一件必不可少的工具，但所有光鲜亮丽的食谱都不会提到它。你之所以需要这件工具，是因为食材的量很重要，你必须准确称量原材料。而要实现这一点，你需要一个行星那么大的（随便什么）物体。对于喜欢葡萄干馅饼、果酱夹层蛋糕和巧克力奶油蛋糕的人来说，幸运的是我们正好就站在这些个体上。

我有一本手写的食谱，里面记录着我从8岁开始搜集的配方。我喜欢翻到最前面回顾过往。胡萝卜蛋糕就能让我回忆童年。那一页潦草的字迹已经沾满了多年积累的污渍，上面写的第一步是称200克面粉。烘焙师的办法其实很聪明，只是我们早已习以为常。他们把面粉放进碗里，然后直接测量地球对它的引力，厨房秤就是用来干这个的。我们把厨房秤放在庞大的地球与小小的碗之间，测量秤受到的挤压力。物体与地球之间的引力与二者的质量积成正比，既然地球质量恒定，那么碗里的面粉质量就成了影响引力的唯一变量。厨房秤测得的重量实质上是面粉与地球之间的引力，这个值等于面粉质量乘以重力加速度，重力加速度是恒定的，所以，只要测得重量（引力），就能根据已知的重力加速度算出碗里面粉的质量。下一步我们需要100克黄油。于是你换一个新碗搁在厨房秤上，往里放黄油，直到厨房秤承受的挤压力达到刚才的一半。这种简单实用的技术可以帮助你测量物体的质量，它适用于这颗行星上的所有物体。物体质量越大，重量就越大，因为地球会对它产生更大的引力。太空中所有物体都会失去重量，因为那里的引力太弱，产生的效果也不够明显，除非你靠近某颗星。

厨房秤为我们上了重要的一课：引力造就了地球和太阳系，而且在人类文明中无处不在，但它其实非常弱小。地球的质量是6×10^{24}千克（6×1021吨），但它对那碗面粉的引力还敌不过一根小小的橡皮筋。当然，要是没有引力，所有生命都将不复存在，但厨房秤带来的启示为我们开启了新的视角。每当你拿起一件东西的时候，请记住，你正在对

抗一整颗行星的引力。太阳系之所以有这么大，就是因为引力很微弱。不过，与其他基本力相比，引力也有一个明显的优势，那就是它的作用距离。引力的确十分微弱，你离地球越远，地球对你的引力就越弱，但它却能跨越广袤的太空，拉扯其他行星、恒星和星系。每个引力都很弱小，但宇宙的结构正是由这些渺小的力构建起来的。

话说回来，哪怕只是从桌上端起做好的胡萝卜蛋糕也需要费点力气。蛋糕放在桌子上的时候，桌面提供的向上的力正好抵消了蛋糕与地球之间的引力。要把它端起来，你花费的力气必须比桌面的支撑力大，这样才能打破平衡，让蛋糕向上运动。在我们生活中起作用的不是某一个单独的力，而是它们抵消和汇总后的合力。这样一来，事情就简单多了。多大的力都可以通过反向的力来抵消。要深入思考这个问题，最简单的办法是先观察固体的受力情况，因为固体在受力时不会变形。伦敦塔桥就是一个固体。

重力也有很烦人的时候，如果你想让物体停留在空中，那就得设法对抗它。要是做不到的话，东西自然就会掉到地上，就像水总是天经地义地流向低处。不过对固体来说，情况有所不同。我们可以用支点有效地抵消重力，撬起重得不可思议的物体，就像在玩跷跷板一样。跷跷板的另一半通常被巧妙地隐藏了起来，伦敦塔桥那两座美丽的高塔就是这方面的典范。两座人工岛将泰晤士河的宽度等分成三份，两座高塔矗立在岛上，守卫着伦敦的入海口，托起贯通城市南北的公路。

塔桥的人行道上总是挤满了手持相机的游客，伦敦出租车、纪念品商人、咖啡摊、遛狗的人和来来往往的巴士组成了这幅画卷的背景。在混乱的人群中穿梭，我们亦步亦趋地跟在导游身后，就像一群听话的小鸭子。导游打开塔基的一道铁门，领着我们绕过墙角，石砌的棚子映入眼帘，看起来就像精致的花园凉亭。周围突然安静下来。你几乎能听见人们如释重负的叹息，我们这些游客终于熬过了严酷的考验，得到了最后的奖赏，看到了黄铜刻度盘、巨型控制杆，还有粗笨的阀门。这都是维多利亚时代留下的坚固工程。塔桥以童话城堡般的美丽精致闻名于世，但现在我们看到的才是它的本质：这头优雅而强壮的野兽拥有一颗庞大的钢铁之心。

早在两千年前，伦敦就已经是一座港口了。河上之城的美妙之处在于，它有两道可供人休憩的河岸，这不仅仅是一小段海岸线。泰晤士河无疑是一条至关重要的水上高速公路，可对徒步行走的人和陆上交通工具来说，它又成了一道天堑。曾有不少桥梁跨越这条河流，随后又消失在历史的尘埃中。19世纪70年代，这座城市迫切需要一座新的桥梁，但问题在于，泰晤士河里常有高高的大船经过，如何在不妨碍船只通行的情况下帮助马匹和车辆横跨河道？最后，人们想出了塔桥这个巧妙的解决方案。

这座小小的石头棚子坐落在一道螺旋楼梯顶端，楼梯另一头旋转向下，连接着塔基旁几个大得不可思议的砖砌洞穴。这些巨洞看起来像是通往纳尼亚大陆[17]的衣橱，但这里的“纳尼亚”不是奇幻世界，而是工程学的王国。第一个洞里安装着古老原始的液压泵，第二个洞比第一个大得多，一头木制怪兽占据了洞穴的大部分空间：那是一个两层楼高的巨桶，可以用来临时储存能量，很像电池。不过，第三个洞才是最大的，这里装着整座塔桥的配重。

两座高塔之间的桥身分成独立的两半。每年大约有1000次，有大船航行到塔桥附近时，桥面上的交通暂时停止。桥身的两半分别向上抬起，与此同时，隐藏在塔基下黑暗洞穴中的配重开始下降，它就是跷跷板的另一头。我抬头仰望巨大的配重块，不禁问道：“我们头顶这些东西到底有多重？”导游格伦高兴地回答：“噢，这里大约有460吨铅锭和少量生铁，它们总在摆动。塔桥升起的时候，你能听到它们发出吱扭声。如果改动了桥面上的建筑，那么配重也要重新调整，这样才能保证塔桥的完美平衡。”显然，世界上最大的沙包正悬挂在我们头顶正上方。

这套方案的关键在于平衡。这一整套机械装置的作用不是硬生生抬起塔桥，而是让它倾斜一点点，支点两侧受力完全平衡。这意味着我们只需要一点点能量就能让它动起来——只要能克服轴承的摩擦力就行。在这套系统中，重力被抵消了，因为跷跷板两头承受的下拉力完全相等。我们无法打败重力，但可以让它自己打败自己。正如维多利亚时代人们已经认识到的，造一个巨大的跷跷板就行。

游览结束后，我沿着河岸走了一小段路，然后回望这座大桥。现在

塔桥在我眼中完全变了模样，我喜欢这种新奇的角度。维多利亚时代的人们没有唾手可得的电力和掌控全局的计算机，也没有塑料和钢筋水泥这样的新材料，但他们却能用最简单的物理原理完成这样宏伟的工程。塔桥的简洁深深触动了我。它之所以如此精确，是因为背后的原理非常简单；也正是这个原因，120年后的今天，这座大桥仍在正常运转，几乎没有任何变化。哥特复兴式（或者说宛如童话城堡般）的建筑风格只是一层包装，塔桥的本质其实是一座巨大的跷跷板。要是有人能重修一座塔桥，我希望它是透明的，让所有人都能看到它的巧妙之处。

用跷跷板的思路解决重力问题的例子还有很多。请想象一个4米高的支点，支点两头各有一块6米长的板子，它们共同组成了平衡的跷跷板。我说的不是大桥，而是霸王龙，它是白垩纪最负盛名的食肉动物。两条粗壮的腿支撑着霸王龙的身体，髋部就是它的支点。霸王龙之所以不会摔个嘴啃泥，是因为它长着恐怖牙齿的沉重头颅与肌肉发达的长尾巴达到了平衡。不过，作为一座行走的跷跷板，霸王龙生活得并不轻松。再一往无前的霸王龙也难免偶尔想转个方向，但这个看似简单的动作对它们来说却很困难。人们估计，霸王龙需要花费一两秒的时间才能转身45度；《侏罗纪公园》里的霸王龙既聪明又敏捷，但在现实世界里，霸王龙不可能那么灵活。庞大强壮的恐龙为什么会有这样的弱点？这都多亏了物理学。

冰上旋转的舞者姿态优雅，充满美感，让人不由得惊叹于人体的无穷潜力。不过，要是跟物理学家一起待得太久，你会不由自主地想到，花样滑冰运动员最大的贡献或许在于，人们可以直观地看到，他们双臂展开时的旋转速度远小于双臂收起的时候。这个例子十分实在，因为冰几乎没有摩擦力，按理来说，在冰上旋转的人，他旋转的“量”是恒定的。真正有趣的地方在于，运动员不用获得外力，他们调整姿态就能改变自己的速度。我们发现，物体离转轴越远，它旋转一圈所运动的距离就越长，于是这一圈就会从总“转量”[18]中消耗较多的一部分。如果你伸开双臂，那么它们离转轴的距离就会变远，为了达到新的平衡，身体转动的速度会相应变慢。这就是让霸王龙苦恼的问题。霸王龙的双腿产生的转向的劲儿（力矩）就是这么多，巨大的头颅和沉重的尾巴又距离转轴太远，就像运动员伸开的双臂一样，所以它只能慢慢转身。要是某只

敏捷的哺乳动物（比如我们的祖先）能想明白这一点，那它的生活就会变得安全得多。

这也解释了我们在快要跌倒的时候为什么会本能地张开双臂。如果我从站立姿势开始向右摔倒，那么实际上，我是在绕着自己的脚踝旋转。要是我能在摔倒之前张开胳膊或者双臂上举，就能抵消一部分外力，赢得更多时间，让我有机会调整姿态，重新站稳。所以平衡木上的体操运动员总是水平展开双臂。这个动作能增大她们的转动惯量，让她们有更多时间调整姿态，避免坠落。除此以外，你还可以上下挥舞双臂，这同样有助于保持平衡。

1876年，玛丽亚·斯佩特里娜（Maria　Spelterina）成为第一个以走钢索的方式跨越尼亚加拉大瀑布的女性。一张照片记录下了她走在钢索中间的一幕，玛丽亚镇定地保持着平衡，脚下还挂着装桃子的果篮，这是为了更有看点。不过，照片里最醒目的还得数玛丽亚手中那根水平的长杆，它是辅助平衡的最佳工具。人的手臂伸展的距离有限，玛丽亚能够精确地控制身体的平衡，平衡杆的功用不可忽视，它可以替代手臂发挥作用。[19]就算身体失去平衡，变化也会来得很慢，因为平衡杆两端之间的漫长距离削弱了力矩的作用效果。人们担心玛丽亚会摔向一边，但手中的长杆阻碍了她的身体从左向右的转动。霸王龙遇到的也是这种情况。玛丽亚没有掉到脚下50米外的瀑布里香消玉殒，7000万年前的霸王龙无法迅速转向，这两件事看似风马牛不相及，但背后的物理学原理却完全相同。

重力对固体产生拉力，这个概念听起来相当熟悉，这主要是因为我们自己也会受到重力的拉扯。不过，世界上除了固体以外还有流动的液体。在外力作用下，水像空气一样，也在一刻不停地流动变化。我们能看到树叶坠落、大桥升起，却不常看到液体的流动，我时常觉得这是一大遗憾。液体同样会受到各种力的作用，但它们不用保持固定的形状，所以流体力学的世界十分美妙。液体自由自在地流淌、旋转、漫延，超乎想象，无处不在。

鱼会打嗝吗？

气泡的可爱之处正在于它们无处不在。我觉得气泡是物理世界的无名英雄，它默默出现在水壶、蛋糕、生物反应堆和浴缸里，低调地完成各种任务，又在大功告成后悄然消失。气泡是我们再熟悉不过的东西，所以我们常常意识不到它的存在。几年前我曾问几组5~8岁的孩子："你们觉得哪些地方可能有气泡出现？"快乐的孩子们给出的答案包括汽水、浴缸和水族箱。可是当我问到最后一组的时候，也许是因为孩子们累了，无论我怎么和颜悦色地鼓励，他们还是不肯说话，只是茫然地瞪着我。休息了很长时间，反复地启发多次以后，终于有个普普通通的6岁孩子举起了手。"那么，"我赶紧换上轻快的语气，"你能在哪里找到气泡呢？"男孩用一种"这还用说吗"的目光瞥了我一眼，然后大声宣布："芝士……还有鼻涕。"我无法反驳他，虽然我以前从没想到过这两样东西。显而易见，这孩子吹鼻涕泡泡的次数应该比我多得多。不过至少对某种动物来说，冒泡的鼻涕决定了它特殊的生活方式——现在，来认识一下紫螺（janthina janthina）吧。

这种紫色的海螺通常生活在海床和海底的岩石上。如果你把紫螺从它栖息的岩石上抠下来，再把它托到稍微高一点的水中并松开手，它就会下沉。古希腊数学家阿基米德（就是那位以"我知道了！"闻名于世的数学家）首次总结出了物体在什么情况下会上浮，在什么情况下会下沉。或许阿基米德只想研究船只，但实际上，浮力定律同样适用于海螺、鲸，以及浸在液体中的任何物体。

阿基米德指出，浸没在液体中的物体与被它排开的液体之间存在明显的竞争关系。海螺和周围的水都受到向下的地心引力，水是一种液体，所以物体可以在水中轻松地运动。作用于某件物体的重力与物体质量成正比。如果海螺的质量增加1倍，那么它受到的重力也会增加1倍。物体周围的水也受向下的重力作用，那么，如果水受到的力相对较大，海螺就只能上浮，好让更多的水流动到海螺下方。根据阿基米德定律，这只倒霉的软体动物受到的向上的推力（浮力）等于被它排开的水受到的向下的重力。实际上，这意味着如果海螺质量大于被它排开的水的质量，那么它将赢得这场重力之战，并且沉入水底；而要是海螺的质量更小（它的密度小于水），那么胜利者就变成了水，水向下流动，螺壳向上浮起。大部分海螺的密度大于海水，所以它们总会沉下去。

大部分海螺都无法逃脱下沉的命运，但在历史上的某一天，某只“普通”海螺遇到了一件倒霉事：一个气泡钻进了它的卵鞘。浮力的特殊之处在于，从本质上说，对特定液体而言，唯一影响浮力的因素是物体的整体密度。要改变物体的浮力，你不必改变它的质量，只要改变它占据的空间就行——气泡就可以占据很多空间。某一天，一个比较大的气泡钻进了海螺的卵鞘，已有的平衡被打破，这只海螺破天荒地在水中晃晃悠悠地浮了起来，漂向头顶的阳光。通往海面的大门轰然打开，那里的食物更加丰富……但海螺必须漂到海面上才能享受这些资源，演化之路就此开启。

今天，这些“漂浮螺”的后裔紫螺已经成了全世界温暖海域中的常见生物。这些颜色鲜艳的海螺会分泌黏液（和花园石板上常见的黏液是同一种东西），再用肌肉发达的斧足搅拌黏液，裹入大气中的空气。它们会建造出比自己的身体还大的气泡筏，以此确保自身的总密度始终小于海水密度。所以紫螺总是倒悬着浮在海面上（泡泡筏在上，螺壳在下），捕食过往的水母。如果你在海滩上看到了紫螺壳，那很可能就是它们的遗物。

浮力可以帮助我们快速分辨某个封闭物体内部有什么东西。如果两罐汽水外表看起来完全相同，但其中一罐是无糖的，另一罐加了很多糖，那么你会看到，无糖汽水在淡水中能浮起来，另一罐则会沉下去。两个汽水罐的体积一模一样，不一样的是罐子里的东西。要知道，糖的密度很大。一罐330毫升的汽水通常含有35~50克糖，额外的质量拉高了汽水罐的平均密度，让它在重力之战中击败了淡水，所以罐子才会沉下去。无糖汽水添加的甜味剂质量极小，罐子里几乎全都是水和空气，所以它会浮起来。

生鸡蛋的例子可能更实用一点。鲜鸡蛋的密度大于水，所以在冷水中，它会平躺着沉到水底；但是在冰箱里放了几天以后，鸡蛋会慢慢失水，蛋壳里的水分悄悄流失，空气分子渗入鸡蛋大头内的气囊。放了一周左右的鸡蛋在水中也会沉底，但会立起来，蛋壳较小的那头朝下，大头内多余的空气离水面更近。如果鸡蛋整个浮了起来，那说明它实在放得太久——早餐还是换些别的吃吧！

当然，要是能控制随身携带的气体量和这些气体占据的空间，那么你就能随心所欲地选择是上浮还是下沉。

刚开始研究气泡的时候，我曾读过一篇1962年的论文，作者一本正经地宣称："气泡不仅仅来自破碎的波浪，还有腐败的物质、鱼打的嗝和海床里的甲烷。"鱼打的嗝？显而易见，作者屁股下面的皮革大扶手椅应该相当舒适，所以他才会说出这种昏话；这把椅子大概位于伦敦某家俱乐部深处，相比大海，这里离醒酒器更近。当时的我觉得这种说法荒谬得可笑，直到三年后，我在库拉索岛的水下与一条巨大的海鲢（长约1.5米）擦肩而过，就在那个瞬间，我清晰地感觉到了它从鳃里喷出的气体。事实上，很多硬骨鱼体内都有辅助控制浮力的气囊（鱼鳔）。如果你能让自己的密度正好等于周围液体的密度，那么你就可以悬浮在原地。海鲢的鳔固然有些特殊（能像海鲢这样直接呼吸空气的鱼类十分罕见，它可以利用自己的鳃过滤氧气），但我不得不承认，鱼的确会打嗝。尽管如此，我依然认为，鱼打嗝对海洋中气泡的形成没有显著影响。[20]

重力作用在不同的物体上会造成不同的结果。塔桥是固体，所以重力只能改变桥的位置，却无法影响它的形状。海螺也是固体，它在海水中运动，周围的海水会随之流动，重新调整达到平衡。气体也会流动，所以液体和气体都被称为流体。在重力的作用下，固体也会在气体中运动：充满氦气的派对气球会飘起来，齐柏林飞艇能浮上天空。其实它们和粘在气泡筏上的紫螺一样。如果要与周围的流体比赛谁的重力大，它们全都会输。

不变的重力可能带来不稳定因素，这通常意味着各种力和物体需要重新调整，直至恢复平衡。不稳定的固体会滑落或者跌落，它周围的液体或气体也会发生相应的流动，为固体的运动腾出空间。但是，如果变得不稳定的不是气球这样的独立固体，而是流体本身，那又会怎样？

蜡烛和钻石

划一根火柴点燃烛芯，跳动的火焰仿佛一道明亮的喷泉，滚烫的气体开始升腾。千百年来，温暖的烛火照亮了无数抄写员、阴谋家、学童

和情人。蜡是一种柔软的燃料，它几乎可以完成所有令人惊喜的变形。跳动的黄色烛焰看似温馨，实际上却蕴含着狂暴的力量，足以撕裂分子、锻造钻石。而且，每一朵烛焰都会受到重力的影响。

就在你点燃烛芯的瞬间，火柴的热量同时熔化了烛芯内部和周围的蜡，让它们变成液体。石蜡是一种碳氢化合物，这种长链分子的骨架由几十个碳原子组成。热量会赋予这些分子能量，让它们像蛇一样彼此缠绕并且蜿蜒游动（看到液态石蜡分子你就懂了）。有的分子得到的能量甚至足够让它们彻底挣脱烛芯的束缚，变成一股灼热的气态燃料。这些分子的温度非常高，所以它们能够以很少的数量推开大量空气，占据可观的空间。这些分子的结构没变，它们受到的重力也和原来一样；但现在，它们占据了更多的空间，那么单位体积内的分子受到的重力也随之下降。

就像海里裹着泡沫的紫螺一样，这些灼热的气体必然会上升，因为周围凉爽致密的空气总会试图溜到它们下面。热空气顺着看不见的“烟囱”上升，一路上与氧气混合。你还没来得及把火柴从蜡烛边上挪开，这些燃料就已经开始在氧气中燃烧分解，于是上升的气体变得更烫，其温度能够达到惊人的1400℃。热空气上升的速度不断加快，你亲手引爆的“喷泉”变得更加绚烂。烛焰不断从下方得到新的燃料，因为烛芯实际上是一根细长的绵条，它会吸取被烛焰熔化的石蜡分子。

在蜡烛燃烧时，最下端的焰火是蓝色的，不会用来照明。长链分子在高温下断裂，但由于得不到足够的氧气，有一部分碎片无法充分燃烧。这些碎片成为滚烫的烟，随着气流上升，我们熟悉的暖色烛光就是它们在1000℃的高温中燃烧发出的。烛光只是高热的副产品，炉火中的热炭发光与之相似，只是规模更大。人们发现，烛焰的光热旋涡不但可以产生石墨组成的烟（就是我们看到的黑烟），有时候碳原子还会聚集起来，形成少量更独特的结构，比如巴克球[21]、碳纳米管[22]和钻石微粒。根据估算，一朵烛焰平均每秒能制造出150万颗纳米钻石。

蜡烛的例子完美展现了流体如何在重力作用下调整自身。凉爽的空气向下涌动，托起熊熊燃烧的燃料，形成持续不断的对流。要是你吹灭了蜡烛，那么在接下来的几秒内，气态的燃料柱仍会向上蒸腾。这时

候，如果你捏着一根火柴从上方向下移动，这根“燃料柱”就会被重新点燃，你将看到火焰凭空跳到烛芯上。[23]

只要流体从下方受热，就会产生这样的对流，帮助能量流动、扩散。这是鱼缸加热器、地热设施和炉子上的炖锅有效工作的关键。要是没有重力，这些设备就没法正常使用了。我们常说“热气上升”，这个说法其实不太准确，更确切地说，应该是“较冷的流体赢得了重力之战，所以它向下沉降”。但如果你非要纠正大家的说法不可，那也没有谁会感谢你。

浮力不光会影响热气球、海螺和浪漫的烛光晚餐。广袤的海洋是我们这颗星球的发动机，和其他所有东西一样，大海也会受到重力的影响。深海并不平静，数百年不曾见过阳光的海水在深处流淌、涌动，缓慢而坚定地向着光明前进。不过，将目光投向深海之前，我们不妨先抬头看看。下次在晴朗的高空中看到飞速移动的小点时，请记住，客机的巡航高度大约是10千米。想象一下：你正站在海床最深处的马里亚纳海沟沟底，[24]那么此时此刻，你到海面的距离差不多正好等于飞机到地面的距离。全球海洋的平均深度是4千米，不到客机巡航高度的一半。海水覆盖了70%的地表面积，所以地球的总储水量的确相当可观。

幽暗的深海中隐藏着我们熟悉的模式。让葡萄干在柠檬汽水中舞蹈的机制同样驱使着广袤的大洋绕着这颗星球缓慢运动。当然，这两种运动的规模差距悬殊，而且海洋运动的结果更加重要，但它们背后的原理的确一模一样。我们这颗蓝色星球的蓝色海洋是动态的。

可是，大海为什么会动？

按理说，海洋有数百万年时间调整自己，适应环境，那么它为什么没有达到稳定的平衡状态？搅动大海的关键有两个：热量和盐度。热量和盐度之所以重要，是因为它们会影响海水的密度。在重力作用下，不同区域密度不同的流体自然会流动和调整。我们都知道，海水是咸的，但只要仔细一想，我总会被大海的含盐量给吓一跳。你不妨看看家里的浴缸，要把一浴缸的水变得像海水一样咸，那么你大约需要加入10千克盐，差不多能装满一个大桶。换句话说，一浴缸的海水里就有整整一桶

盐！而且大海的盐度并不均匀——海水含盐量为3.1%~3.8%，这个范围看似很小，却很重要。含糖汽水的密度比无糖的大，含盐量高的海水也比淡水密度大。水的密度还会随着温度的降低而增大，海水的温度范围为极地附近的0℃到赤道附近的30℃。含盐量较高、温度较低的水会下沉，而含盐量低、温度高的水总会上升。这个简单的原理推动着全球的海水不停运动。大海里的一滴水可能要花费数千年时间才能完成环球之旅，回到自己的出发点。

北大西洋的风还会吹走热量，所以这里的海水温度更低。[25]刚刚在海面上凝结的时候，海冰的主要成分是水，盐被排除在冰层之外。这样的凝结过程让海水更冷、盐度更高、密度更大。在重力作用下，冷却的海水开始下沉，同时将密度较小的水向上推挤。冰冷的高盐度水在海床上蜿蜒流动，被海底的山谷和山脊限制和阻碍，就像地面上的河流一样。这些海水从北大西洋出发，以每秒几厘米的速度沿着海底向南流动。1000年后，它们终于遇到了第一个真正的大障碍：南极洲。无法继续向南的海水转而向东流动，进入南大洋。这片海域是地球上所有水系的枢纽。海水围绕着白雪皑皑的南极洲，与大西洋、印度洋和太平洋的最南端融为一体。从北极出发的缓慢水流沿着南极洲的海岸运动，最终会再次掉头向北，进入印度洋或太平洋。在这个过程中，它与周围的海水不断融合，密度一路降低，离海面也越来越近。在黑暗的深海中流淌了大约1600年后，这股水流终于又见到了阳光。雨水、入海的河流以及融化的冰不断稀释海水中的盐，海风推着洋流踏上回归北大西洋的旅途。回到起点后，这些水或许又将开始下一个循环。这个过程叫作“温盐环流”：“温”代表温度，“盐”指的是盐度。海水的循环有时候也会被称为“大洋传送带”，这里的描述经过了一点简化，但海水的确会绕着地球流动，驱动这个过程的也的确是重力。

千百年来，海风推动着海面洋流，将探险家和商人送往地球的各个角落。但在深海之中，还有一种同等重要的货物在被系统地输送着，它就是热量。

在地球上，赤道附近吸收的太阳热量最多。这一方面是因为赤道的太阳高度角常常是最大的，另一方面是因为这个纬度的地球周长最长，可吸收热量的面积最大。水的比热容很大，哪怕它升温一点点也能吸收

大量的热，所以温暖的大洋就像储存着太阳能的巨型电池。随着海水的流动，这些能量被送往不同的区域，温盐环流悄悄影响着天气。稀薄多变的大气在空中流动，水体形成的稳定热量库在下方不断提供能量，对激变进行缓冲。

大气是最终的受益者，但海洋才是王座背后的力量。下次看到地球卫星图的时候，请提醒自己，大陆固然有趣，蔚蓝的海洋也绝不是填补空隙的无意义地带。想象一下在重力作用下缓慢流淌的巨大洋流，你就会看到那一抹蔚蓝的本质：它是这颗星球最大的发动机。

小即是美

- 表面张力和黏度 -

咖啡渍和显微镜

咖啡是一种风靡全球的珍贵商品。如何从貌不惊人的咖啡豆中提取精髓永远是鉴赏家争论的焦点，争论有时甚至会上升到个人品位的高度。不过，我个人并不关注咖啡豆的烘焙方式和浓缩咖啡机的压力大小，我感兴趣的是溅到杯子外面的咖啡。[26]日常生活中充斥着这样的小意外，谁都不会多关注半分。硬质表面上的咖啡渍看起来毫不起眼，只是一摊水滴状的液体而已。但是等它干了以后，你会发现咖啡渍外沿形成了一条褐色的线，就像20世纪70年代的侦探剧里画在尸体周围的轮廓线。咖啡刚溅出来的时候当然是完整的一摊，但是在蒸发的过程中，所有褐色的物质不约而同地向外侧移动了。紧盯着一摊咖啡等它干掉就和盯着一幅水彩画等它晾干一样无聊，就算你目不转睛地盯上半天，也很难看出其中的奥妙。让咖啡汇聚成线的物理机制只在极小的尺度上起效，因此不可能用肉眼直接观察到，但我们可以看到它造成的结果。

如果在显微镜下观察咖啡液滴，你会看到水分子正在乐此不疲地玩碰碰车，庞大的褐色咖啡粒子就夹杂在这些分子中间。水分子之间的引力很强，如果有某个分子向液面外凸出了一点，其他分子立即会把它拉回大家庭里。这意味着水形成的液面就像某种弹性薄膜，下方的水一直在向下拉扯它，所以液面永远是光滑的。液面的这种弹性就是“表面张力”，稍后我们会详细介绍这个概念。而在液滴边缘，液面光滑地向下弯曲，与桌面相交，维持着液滴的位置和形状。但是，房间里相当暖和，时不时有某个水分子离开液面，以蒸汽的形式上升到空气中。这个缓慢的过程叫作蒸发，蒸发出去的只有水分子。咖啡的微粒不会蒸发，只能留在液滴里。

随着越来越多的水分子蒸发到空气中，奇妙的事情发生了。液滴的

边缘在桌上是固定的（原因我们稍后会解释），而且边缘处水分子蒸发的速度比其他位置快得多，因为这里的水分子接触空气的机会更多。就算你能说服和你一起喝咖啡的朋友盯着咖啡滴等它变干是最新的潮流，你也看不到液滴里的物质在一刻不停地运动。液滴中央的咖啡必须不断向外移动，去补充边缘处蒸发掉的水分。水分子裹着咖啡粒子向外运动，等到水分蒸发以后，无法蒸发的咖啡粒子就留了下来。在这个过程中，所有咖啡粒子都慢慢被搬运到了液滴边缘，等到水分子彻底蒸发，留下来的就是一圈褐色的轮廓。

我对这个过程如此着迷，主要是因为它就发生在我的眼皮底下，但是这太微观了，我们看不到最有趣的细节。微观世界对我们来说完全是另一个世界，那里另有一套运转规则。你很快就将看到，我们熟悉的一些力在微观世界依然有效，比如重力，但在那个世界里，分子之舞产生的另一些力也扮演着相当重要的角色。如果能够深入微观世界，你会看到一些非常奇怪的现象。最终你会发现，主宰微观世界的规则其实能够解释宏观世界里的很多事情，比如牛奶上漂浮的那层奶油去了哪里，比如镜子为什么会起雾，比如树如何吸收水分。我们将学会利用这些规则改造宏观世界。除此以外，我们还将看到这些规则如何帮助我们改进医院设计，完成新药测试，拯救成百上千万条生命。



要对微观世界产生兴趣，首先你必须知道它的存在。不过，如果不知道有微观世界，你又怎么会去探寻它呢？这可真像第22条军规的悖论。[27]1665年，一本书的问世改变了这个局面，这就是有史以来第一本科学畅销书：罗伯特·胡克的《显微图集》（Micrographia）。

罗伯特·胡克是英国皇家学会的实验管理员。他是一位通才，精通当时已知的各个学科。《显微图集》是胡克专为显微镜编撰的推广材料，他想让读者看到这种新设备的巨大潜力。这本书赶上了好时代。那个年代实验科学盛行，人们对科学的理解一日千里。数百年来，镜片一直没有得到主流科学界的重视，它更像是某种新奇的小玩意儿，而不是科学工具。但是，随着《显微图集》的出版，镜片迎来了春天。

这本书的精彩之处在于，它不仅仅是在严肃性和权威性上沾了英国

皇家学会的光。单从内容上说，它也是一本分量十足的科学著作。《显微图集》图片精美，介绍详尽，编撰严谨，品质精良。但是从本质上说，罗伯特·胡克所做的和任何一个第一次接触显微镜的孩子没什么两样，他把周围的一切事物都放到了镜头下面。我们可以在这本书里看到各种物品的显微照片，从剃刀刀片到荨麻刺，再到沙粒、烧焦的蔬菜、头发、火花、鱼、蠹鱼[28]和丝绸。显微镜所揭示的细节令人震惊。谁知道苍蝇的眼睛竟然那么美丽？不过，在仔细观察之余，胡克并未深入研究微观世界。他在书中某一章谈到了常见的尿路结石，并初步提出了治疗这种痛苦疾病的方法，但他没有进一步探讨，而是高高兴兴地把实际的工作推给了别人。

因此，这或许值得探究：含有碎石的尿液中是否存在其他物质，能让这些固体再次溶化到尿液中去？从图片上看，这些碎石似乎正是从尿液中凝结出来的……不过，这个问题应该留给医生或者化学家，我还是接着往下讲别的好了。

于是，胡克又描绘起了显微镜下的霉、羽毛、海藻、蜗牛的牙齿和蜜蜂的螯刺。他还创造了“细胞”这个词，专指软木塞的基本组成单位。从此以后，生物学成为独立的学科。

胡克不光为我们指出了通往微观世界的道路，他还直接推开了那扇大门，邀请所有人加入这场盛大的派对。接下来的几百年里，《显微图集》启迪了好几位最负盛名的微生物学家，也在时尚之都伦敦掀起了科学的热潮。微观世界的迷人之处在于，这个精彩的国度一直在那里，但人类对它一无所知。现在我们发现，绕着腐肉嗡嗡飞行的烦人苍蝇原来是微型的怪兽，它长着毛茸茸的腿、圆鼓鼓的眼睛和坚硬的刚毛，浑身披着闪亮的铠甲。这真是个令人震惊的发现。在那时，航海家已经走遍世界，发现了新大陆和新人种，远方仍有大量惊喜等待人们。但是谁都没有想到，我们竟然错过了眼皮子底下的这么多精彩，一小撮肚脐绒毛里就可能藏着一个小世界。面对毛茸茸的跳蚤腿，最初的惊奇退去以后，人们便开始探索背后的科学。微观世界自有运转规则等待人们来了解。人类开始利用显微镜研究一些多年前就已发现却一直没找到确切原因的现象。

不过，这仅仅是我们迈向微观世界的第一步。《显微图集》出版二百多年后，人类才首次确认了原子的存在。原子的个头比细胞更小，胡克描绘的软木塞细胞，其长度大约相当于10万个原子排成一条线。正如著名物理学家理查德·费曼（Richard Feynman）在多年以后所说的，没有最小，只有更小。人类在中等尺度的世界前行，无法触摸构建世界根基的微观结构。不过，在胡克的《显微图集》出版350年后，事情有了转机。原来的我们只能远远地观察那个微观世界，无法触碰任何东西，就像在博物馆橱窗外张望的孩子一样。而现在，我们正在学习如何操纵微观尺度上的原子和分子。橱窗外的玻璃被拆掉了，我们走进那个世界，“纳米”逐渐成为潮流。

微观世界之所以迷人且蕴藏实用性，关键在于这个尺度占据主导的物理学规则与宏观世界完全不同。人类完全不可能做到的事情或许正是跳蚤的生存技能。当然，所有物理学规则在微观世界和宏观世界都同样有效，跳蚤和我们生活在同一个物质世界中。只是两个世界里占据主导地位的力大不相同。[29]影响宏观世界的物理因素主要有两种：第一种是重力，它向下拉扯所有事物；第二种是惯性，由于我们的体积相对庞大，所以无论是加速还是减速，我们都需要消耗大量的力。不过，随着尺度的不断缩小，惯性和重力所关联的拉力也会变小。最后我们发现，那些原本一直存在，但在宏观世界里无关紧要的弱小的力逐渐拥有了与重力和惯性竞争的实力，甚至开始占据上风，比如让咖啡在干涸过程中形成轮廓线的表面张力，还有黏性。正是由于黏性的存在，你的牛奶瓶里那层漂亮的奶油才会消失。

偷吃奶油的蓝山雀

有的鸟儿最喜欢金色和银色瓶盖的牛奶瓶。要是你起得够早，开门的时候够小心，也许你能抓个现行。眼睛明亮的小鸟趾高气扬地站在牛奶瓶上，一边透过它在瓶口铝箔上啄出的小洞匆匆偷吃奶油，一边警惕地观察周围。一旦发现有人靠近，它就会立即飞走，或许去邻居家的门廊上碰碰运气。50年来，蓝山雀（blue tit）一直是英国偷吃奶油的大师。它们互相通气，都知道那张薄薄的铝箔下面就是富含脂肪的宝藏。其他鸟儿似乎还没发现这个，而蓝山雀每天早上都会守候送奶工的到

来。但是突然有一天，这套把戏行不通了，不光是因为塑料牛奶瓶取代了玻璃瓶和铝箔封口，还因为一些更基本的东西发生了变化。以前牛奶瓶里的奶油必然会浮到顶层，但现在，情况不一样了。

饥饿的蓝山雀青睐的牛奶含有多种营养物质。牛奶的主要成分（约占90%）是水，水里漂浮着糖（即某些人无法消化的乳糖），还有蛋白质分子和较大的脂肪球。这些东西都混合在一起，不过静置片刻，牛奶就会分层。牛奶中的脂肪球个头很小，直径为1～10微米，也就是说，尺子上1毫米的刻度里可以填进去100～1000个脂肪球。这些小球的密度小于周围的水，因为同样体积的脂肪球质量更小。因此，尽管牛奶中的各种微粒都在不断运动、碰撞，但脂肪球的运动方向与其他物质有些不同。重力作用于水分子的拉力略大于作用于脂肪球的拉力，所以这些脂肪会被水分子轻轻向上推挤。这意味着尽管脂肪的浮力非常微小，它仍会缓慢地上升到牛奶的顶层。

问题在于：它上升的速度到底有多快？这时候我们就需要考虑水的黏性了。黏性衡量的是两层流体之间的摩擦力。想象一下，如果拿勺子搅动一杯茶，那么随着勺子的运动，勺子周围的液体也会随之旋转，与杯子里的其他液体产生相对运动和摩擦。水的黏性不算大，所以这些不同层的液体可以比较轻松地相对流动。不过，如果把这杯茶换成糖浆，你又会看到什么呢？糖分子彼此更加紧密，要让它们发生相对运动，你必须打破分子之间的羁绊。所以搅动糖浆比搅动茶水困难得多，因此我们会说，糖浆的黏性较大。

因为牛奶中的脂肪球拥有浮力，所以它们会被别的成分向上推挤。不过，要想真的浮到水面上，这些分子必须挤出一条路来。推挤过程中，不同层的液体必然产生相对运动，黏性也因此成为重要的影响因素。黏性越大，脂肪球上升遇到的阻力就越强。

战争在蓝山雀脚下的牛奶瓶里悄然爆发。每个脂肪球都被浮力推着向上移动，但周围的液体又会对它产生阻力。不同大小的脂肪球受到的阻力不同。体积越小，阻力越大。同样的上浮之路对小个子来说更艰苦，需要推开的液体更多，而它的浮力却比大个子小。因此，在同样的液体中，体积较小的脂肪球上升的速度比体积大的那些慢得多。一般来

说，微观世界里黏性的影响力大于重力，所有东西移动的速度都很慢，物体的确切体积是非常关键的影响因素。

牛奶中体积较大的脂肪球上升得更快，体积较小、移动较慢的脂肪球会吸附在这些大球上面，形成脂肪球簇。这些球簇的阻力/浮力比相对更小，因为它们的体积比单个脂肪球大，所以上升的速度也更快。蓝山雀只需要蹲在瓶口静静等待，早餐就会自动送到脚下。

然后我们就要谈到均质乳化[30]了。牛奶生产商发现，如果能让牛奶在极大的压强下从极细的管子里喷出去，就能打破牛奶中的脂肪球，让它们的直径缩减到原来的1/5。也就是说，这些脂肪球的质量会变成原来的1/125。在这种情况下，和重力紧密相关的浮力完全无法与黏性带来的摩擦力抗衡。经过均质乳化处理的脂肪球上升的速度非常缓慢，甚至完全不会上升。[31]打碎脂肪球彻底改变了这场战争的走向，黏性获得了压倒性的胜利。奶油不再上浮到牛奶瓶顶层，蓝山雀只能去别的地方寻觅早餐了。

所以，相同的力在不同层级上产生的效果大相径庭。[32]气体和液体都有黏性，虽然气体分子之间的结合远没有液体分子那么紧密，但它们仍在不断碰撞，这场盛大的碰碰车游戏会产生相似的效果。因此，小虫和铁球坠落的速度绝不会完全相同，除非你抽掉所有空气，将它们坠落的环境变成真空。空气黏性会大大拖慢小虫的速度，却不会对铁球造成太大影响。如果你抽掉了空气，那么重力就成了唯一的影响因素，对小虫和铁球来说都一样。小虫在空中飞行时运用的技巧和我们在水里游泳时的一模一样。空气的黏性主宰着小虫周围的环境，一如水的黏性统治着游泳池。那些体形微小的昆虫其实更像是在空气中游泳，而不是飞翔。

牛奶均质乳化背后的原理还能运用到其他很多地方。下次打喷嚏的时候，不妨想一想你喷出的液滴尺寸有多大。如果尺寸太小，那么这些携带病菌的液滴可能会一直飘浮在空气中，很难坠落下去。

飞沫和肺结核

数千年来，结核病一直是困扰人类的顽疾。最早的肺结核病人是一具死于公元前2400年的古埃及木乃伊。公元前240年，医学之父希波克拉底（Hippocrates）就已描述了与肺结核相关的病症，中世纪欧洲王室还曾积极寻找治愈淋巴结核的良方。

工业革命以后，城市人口增多，肺结核开始在城市的贫民区中盛行。19世纪40年代，肺结核的死亡人数占了英格兰和威尔士总死亡人数的1/4。直到1882年，人们才找到了引发肺结核的罪魁祸首。它是一种微小的细菌，名叫“结核分枝杆菌”。查尔斯·狄更斯（Charles Dickens）曾描写过肺结核流行时人人咳嗽的场景，但他无法描述这种疾病最重要的特征，因为这一点他根本看不见。肺结核是通过空气传播的，患者每一次咳嗽都会从肺里喷出数千颗细小的液滴，部分液滴中包含着微小的结核杆菌，这些细菌的长度只有1毫米的3/1000。刚刚离开人体的液滴较大，直径可能有零点几厘米。这些液滴在重力的拉扯下向下坠落，落到地板上以后，它们就哪儿都去不了了。但是，液滴坠落的过程非常缓慢，因为除了液体以外，空气也拥有黏性——物体在空气中移动时必须奋力向前推挤。向下坠落的过程中，液滴不断遭到空气分子的碰撞和推挤，这又延缓了它的速度。正如牛奶的黏性拖慢了奶油的上升速度，这些液滴向下坠落的旅程同样也会受到空气黏性的阻挠。

但它们不一定下坠。液滴的主要成分是水，刚被喷出来几秒钟，这些水会蒸发。原本还算饱满的液滴萎缩变小，它受到的重力也会随之减小，很难与空气黏性抗衡。如果说原来的液滴是一颗携带着结核杆菌的水珠，那么现在它就变成了结核杆菌与有机杂质的混合物。对于新形成的微粒来说，它受到的重力已经不足以抵消空气阻力，所以它只能随风飘动。就像均质乳化的牛奶中那些细小的脂肪球一样，结核杆菌随波逐流。如果它正好降落在某个免疫系统功能较弱的人身上，那么就可能繁殖出一个新群体并逐渐发育壮大，直到新的细菌做好再次出发的准备。

只要有对症的药物，肺结核是可以治愈的。所以时至今日，西方世界里几乎已经没有肺结核病人了。不过就在我写作本书的年代，对人类来说，结核杆菌仍是仅次于艾滋病的第二号杀手，也是一些发展中国家面临的严峻挑战。2013年有900万人感染结核杆菌，其中150万人因此丧命。这种细菌会针对抗生素进行变异，产生极强的抗药性，无法对抗

它的抗生素越来越多。医院和学校时不时会暴发疫情。近年来，病人喷出的微小液滴渐渐变成了人们关注的焦点。与其等到人们得了肺结核以后再去治疗，何不想办法从源头切断这种疾病的传播路径？

卡斯·诺克斯（Cath Noakes）教授就职于利兹大学（University of Leeds）土木工程系，她对这方面的课题很感兴趣。深入研究飘浮微粒的性质，由此找出相对简单的解决方案，这是卡斯关注的重点。现在，她和其他工程师正在研究携带病菌的微粒如何运动，结果他们发现，这些微粒的运动轨迹与它们的成分或者存在的时间几乎完全无关。微粒的运动完全取决于各种力的综合作用，而这场战争的关键在于粒子本身的尺寸。人们发现，那些最大的液滴运动的距离远远超过我们的想象，因为空气中的湍流会帮助它们悬浮在空中。[33]最小的液滴能在空气中停留好几天，不过紫外线和蓝光会破坏它们的活性。知道了粒子的大小尺度，你就能推测出它们可能的去向。所以，如果你正在为医院设计通风系统，那么你就能根据这方面的原理去驱赶或保留特定大小的微粒，从而控制疾病的传播。卡斯告诉我，每种通过空气传播的疾病都有自己独特的进攻方式，具体取决于致病所需的病原体数量（比如，极少量的麻疹病毒就能让人发病）以及疾病侵袭的身体部位（比如，结核杆菌在肺里和在气管里产生的效果是不一样的）。这方面的研究才刚刚起步，不过发展速度很快。

数千年来，在与结核杆菌的战斗中人类一直处于下风，不过现在，我们可以直观地看到病菌的传播，这为控制疾病提供了绝佳的机会。我们的祖先只知道病人的房间里弥漫着酸臭的气味，仿佛有神秘的瘴气充斥其中。现在，我们知道病人会让空气变化，知道携带病菌的微粒会不断运动、分流，也明白这最终会造成什么结果。这些研究的成果将纳入未来医院的设计之中，通过宏观工程影响微观粒子的举措将拯救成千上万条生命。

小体积物体在单一流体中运动时必须考虑黏性的影响。牛奶里上浮的脂肪球和空气中坠落的病毒微粒都是这样。在微观世界里，黏性还有一位形影不离的伙伴——表面张力，它主要作用于两种不同流体发生接触的场合。对我们来说，最常见的就是空气与水接触，气泡就是个最佳范例。[34]我们不妨从泡泡浴开始讲解这个问题。

“家庭主妇”和肥皂泡

往浴缸里放水的声音总是让人心情愉悦，这意味着漫长的一天已经结束，享受的时刻即将到来。你或许刚刚经历了一场异常艰难的羽毛球赛，或者只是吃饱喝足、浑身慵懒，无论如何，浴缸都是你现在最向往的地方。不过，往浴缸里倒了泡泡沐浴液以后，悦耳的水声立即变了。随着泡沫的不断生成，哗啦啦的水声变得低沉柔和，水和空气之间的界限开始模糊。一团团空气被关进了水汪汪的笼子，引发这一切的就是你从瓶子里倒出来的沐浴液。

19世纪末，欧洲的一群科学家揭开了表面张力之谜。维多利亚时代的人们热爱气泡。从1800年到1900年，肥皂生产业飞速扩张，白色泡沫保障了工业革命时期工人的个人卫生，让整个时代干净整洁。肥皂泡还提供了绝佳的道德说教素材，因为洁白的泡沫是洁净与无辜的完美象征。除此以外，泡泡也是物理学在生活中的化身，它代表着人们心目中那个整洁、规范、井井有条的宇宙，然而谁也没有料到，短短几年后，狭义相对论和量子力学就戳破了美丽的肥皂泡。然而，揭开泡沫之谜的并不仅仅是那些头戴礼帽、留着胡子的正经科学家，泡沫如此常见，任何人都可以尝试着去研究它。在很多文章的描述中，阿格内斯·波克尔斯（Agnes Pockels）仅仅是个“德国家庭主妇”，但实际上，她是一位头脑敏锐、富有批判性的思考者。靠着手边仅有的材料和恰到好处的奇思妙想，她亲自验证了表面张力的存在。

阿格内斯于1862年出生于威尼斯，作为那个时代的女性，她坚信家庭是女人最好的归宿。于是，在兄弟去上大学的时候，阿格内斯留在了家里。不过，她利用兄弟寄回来的教材学习了先进的物理学，还试着在家里开展实验，就这样，她渐渐追上了主流学术界的进度。有一天，阿格内斯听说英国著名物理学家瑞利勋爵（Lord Rayleigh）对表面张力的课题颇有兴趣，而她做过这方面的很多实验，于是阿格内斯给瑞利勋爵写了一封信。勋爵非常欣赏阿格内斯在信里描述的实验结果，于是他把这些数据发表在了《自然》杂志上，好让同时代最伟大的科学家们都能看到。

阿格内斯的实验简单而巧妙。她把一小块金属圆片（大约相当于纽

扣大小）系在一根绳子上，并将它放到水面上。然后，她测量了要让金属片离开水面需要多大的拉力。奇妙之处在于，水会对金属片产生一种“吸力”，从水面上提起金属片需要的力大于你从桌面上提起它所需的力。水的这种“吸力”就是我们所说的表面张力。通过测量提起金属片所需的力，阿格内斯算出了表面张力的大小。然后，她进一步研究了水的表面，尽管提供“吸力”的分子层薄得根本无法直接看见。我们很快就将介绍阿格内斯的研究方法，不过在此之前，我们先回过头去继续谈谈浴缸。

装满水的浴缸无异于一个巨大的碰碰车游乐场，水分子在这里碰撞、运动、狂欢。不过，水之所以如此特殊，是因为水分子之间的引力非常强大。每个水分子都有一个较大的氧原子和两个较小的氢原子，也就是H2O中的H和O。氧原子位于分子中央，两个氢原子分布在它两侧，形成一个张开的V形。可是，尽管与自己的氢原子结合十分紧密，氧原子仍不会放过偶然路过的其他粒子。氧原子总在不断吸引其他水分子的氢原子，形成人们所说的氢键。氢键的力量让水分子凝聚成了整体。浴缸中的水分子总在彼此吸引，将一整缸水凝为一体。

位于表面的分子却有点不一样。它们会受到下方水分子的吸引，但上方却没有别的水分子。表面这层水分子受到的力有向下的、向侧面的，却没有向上的，于是它们形成了一张有弹性的薄膜，紧紧包裹着下面的水分子，同时尽可能地向内收缩，减小自己的面积，这就是表面张力的来源。

你打开水龙头，水裹挟着空气冲入浴缸形成气泡。不过这些气泡浮到水面上以后无法维持太长时间。这是因为水的表面张力太大了，构成气泡的水分子会被其余的水分子死死拉住，这往往导致气泡破碎。

阿格内斯的实验内容之一是，轻轻向上提拉金属薄片，但不要让金属片离开水面。接着，她在金属片附近的水里加了一滴洗涤剂，1~2秒后，金属片轻松地离开了水面。扩散的洗涤剂降低了水的表面张力，因为它取代了表层的水分子，让水不必直接接触空气。

加了沐浴液以后，浴缸里的水无法再维持面积最小的平坦表面。进入水中之后，黏稠芬芳的浴液立即扩散开来。每个浴液分子都有一端亲

水，另一端疏水。疏水端一旦接触空气就会牢牢抓住，亲水端接触水时同样如此，于是浴液最终会停留在水与空气的接触面上。这层浴液只有一个分子那么厚，每个分子的亲水端都停留在水面下，疏水端则暴露在空气中。浴液的表面张力比水小得多。派对开始了，大量泡沫出现在水面上。通过降低表面张力，浴液让气泡的表面变得更加稳定，从而延长了它存在的时间。

或许值得一提的是，我们总觉得白色的泡沫能把东西洗干净，然而对于现代洗涤剂来说，起泡成分和清洁成分其实是两回事。完全无泡的洗涤剂也能把东西洗得干干净净，事实上，泡沫还常常会妨碍清洁过程。不过，清洁产品供应商的宣传做得太好，人们固执地认为美丽的白色泡沫就是清洁力的保证，所以现在这些生产商骑虎难下，只能在洗涤剂里添加起泡剂，否则消费者不会买账。

和黏性一样，表面张力在宏观层面上也同样明显，不过它的重要性通常比不上重力和惯性。越小的物体越容易受到表面张力的影响，所以你的泳镜才会起雾，毛巾才能吸水。微观世界的美妙之处在于，一个宏观物体中可能隐藏着众多微观过程，而且它们的效应会叠加起来。我们可以说，表面张力只有在微观层面上才会占据主导地位，但它也成就了地球上体形最大的生物。不过，要解释这个道理，我们得先了解表面张力的另一面，也就是气体和液体之间的表面，当它遇上固体时会发生什么呢？

泳镜上的雾

第一次在开放水域中游泳的经历让我明白，这种运动不适合胆小鬼。幸运的是，事前我完全不知道这一点，所以也毫无心理负担。在圣迭戈的斯克里普斯海洋研究所工作的时候，我的游泳小组每年最盛大的活动是从拉荷亚的海滩到斯克里普斯码头游一个来回，这条路线总长4.5千米，需要游过一条幽深的海底峡谷。

在此之前我只在游泳池里游过泳，不过我喜欢尝试新事物，而且游泳经验也还算得上丰富，所以我报名参加了活动，并暗自祈祷到时候千万别太露怯。出发的时候场面有些混乱，不过大家游开以后就好多了。

在第一段行程中，我们从一大片壮观的海藻森林上方游过，感觉像是在飞。穿过海藻缝隙的阳光闪烁着点点金光，就像森林里透过枝叶投射到地面上的光斑。巨大的海藻伸向海底深处，最终消失在一片朦胧之中，我不由得想到，在我看不见的深处，有多少生物正自在地游弋。离开海藻森林后，海浪变得更加汹涌，我不得不分出更多精力来维持正确的方向。行程开始变得有些困难。远处地平线上的码头看起来模糊一片，我也完全看不清下方的海水里有什么东西。过了好一会儿我才发现，我之所以什么都看不见，是因为泳镜起雾了。噢，原来是这样。

从温暖的皮肤上蒸发的汗水在塑料泳镜里形成大量蒸汽。我游得越努力，蒸发的汗水就越多。现在我的泳镜内部变成了一个迷你桑拿房，里面又热又潮湿，但周围的海水却凉爽宜人，外面的环境不断地冷却泳镜的镜片，空气中灼热的水分子碰上凉爽的塑料镜片就会释放出热量，冷凝成液体。但这还不是关键。真正的问题在于，这些水分子在镜片内侧凝结成液体后还会自发地聚集起来，也就是说，水分子彼此之间的引力远大于塑料对水分子的引力。表面张力让水分子向内凝聚，迫使它们聚集成微小的水滴，以便缩小表面积。这些水滴都很小，直径可能只有10～50微米。作用于水滴的重力无法抵消镜片与水滴之间的摩擦力，你就算等得再久，它们也不会自己流下去。

每个小水滴都会像镜片一样扭曲并反射光线。我抬头遥望码头的时候，光线先被泳镜上的水滴折射，然后才进入我的眼睛。无数小水滴就像镜子做的小房子，它们打乱了图像，所以我只能看到一片模糊的灰色。我停下来洗了洗泳镜，远方的码头又重新变得清晰起来。可是没过多久，讨厌的雾气又回来了。起雾，清洗，起雾，清洗——这样的循环令人疲惫，最后我只能紧跟搭档，因为她戴着一顶鲜艳的红色泳帽，哪怕镜片起雾，我也能看得清清楚楚。

到达码头以后，我们停下来检查了一下每个人的状态。在这短暂的时间里，我想起一位水肺潜水者大约一周前教过我一个小技巧：在泳镜的镜片内侧吐点唾液，然后把它抹匀，镜片就不会起雾了。刚听到这个的时候我做了个鬼脸，而现在，我实在不想再当睁眼瞎，所以就照办了。返程的体验果然大不相同。我的搭档觉得太无聊，她想赶快游回去，所以我只能拼尽全力跟着她。不过更重要的是，现在我能看清周围

的景象了——游泳的人、海藻、目标海滩，还有偶尔从身边游过的好奇的鱼儿。唾液的作用类似洗涤剂：它会降低表面张力。我的泳镜依然是个迷你桑拿室，泳镜内部的水蒸气依然稠密，但现在，由于表面张力太小，水分子无法凝聚成水滴，只能在镜片上形成一层薄膜，自然也就不会遮挡视线了。回到海滩上以后，我的心情十分愉快，因为完成挑战带给我解脱感，也因为我对水下世界有了新的体悟。

在物体表面喷洒薄薄的一层表面活性剂就能有效防雾。能够充当表面活性剂的东西有很多，包括唾液、洗发水、剃须泡沫，还有昂贵的商用防雾剂。涂了表面活性剂以后，凝结的水汽会立即被这些化学物包裹起来。这些活性剂的表面张力很小，所以水分子无法凝聚成水珠，只能均匀地分布在物体表面。如果没有更强的外力，这层水膜将一直留在泳镜内侧。而“更强的外力”唯一可能的来源就是表面张力，既然强大的表面张力已经不复存在，问题也就迎刃而解了。[35]

降低表面张力是解决方案之一。除此以外，还有一条路：增加镜片对水分子的吸引力。水滴会自动凝聚成球，如果你把水倒在塑料或玻璃表面上，水滴会高傲地抱成一团，尽量减小自己与塑料接触的面积。但是，如果接触面吸引水分子的能力足以与水分子之间的引力抗衡，那么水珠就会牢牢吸附在接触面上。它们不再是接近圆形的水珠，而是变成扁平的一摊，这时候，水分子之间的引力和接触面对水分子的吸引力大致相等。最近我买了一副配备了亲水镜片的泳镜，水汽依然会凝结，但在亲水层的吸引下，这些水分子会均匀分布在泳镜内侧，泳镜再也不会起雾了。[36]

毛巾和巨型红杉

降低表面张力在某些情况下是很有帮助的，但是水分子之间强大的引力也有实用性。水量越少，分子之间的引力就越不可忽视。在微观层面，我们甚至可以利用表面张力来抽水。这里不需要泵、虹吸管和大量能量，我们也能让水流动起来；你只需要把东西做得足够小，让重力退居幕后，为表面张力留出大显身手的舞台。打扫清理总是十分无聊，但没人打扫的世界相当糟糕。

我是个邋遢的厨子。我做饭的手艺还算不错，但我只爱烹饪，完全不想收拾自己在厨房留下的烂摊子。在别人的厨房里做饭时我总是很紧张。很多年前，我曾在波兰的一所学校里和一群国际志愿者一起工作，有一天，我打算为大家做个苹果派。[37]起初事情并不顺利。我找学校里那位脾气暴躁的高个子厨师借用厨房的时候，她兴高采烈地冲我大喊了一声："NO!"困惑了好几秒以后，我才终于想起来，波兰语里的"NO"代表同意。我的波兰语相当蹩脚，所以接下来她说的话我基本都没听懂，但我至少听明白了她再三强调的一点：做完饭以后必须把厨房打扫干净，要一尘不染，不准弄洒任何东西。要保持绝对的洁净无瑕。那天晚上，在她回家以后，我准备好了所有原料，然后接下来，我干的第一件事情——自然是打翻了一大盒刚开封的牛奶。

我的第一反应是希望这些牛奶立即消失，不要让那位严厉的厨师发现什么蛛丝马迹。但牛奶又黏又滑，既不能捡起来，也不能用扫帚扫走，而且它正以惊人的速度在厨房地板上漫延。不过，有一件工具非常适合收集液体，它能将液体聚拢到一个地方。这种工具名叫毛巾。

一旦毛巾接触到牛奶，原来的平衡立即打破。毛巾是用棉花做的，棉花能吸水。在微观层面上，水分子牢牢地吸附在棉花纤维上，沿着每根纤维的表面缓慢爬行。由于水分子之间的引力很强，所以第一个接触毛巾的水分子会把后面的一串伙伴都拉上来。水携带着牛奶里的其他成分沿着棉花纤维迅速漫延。水与毛巾纤维之间的吸附力非常强，区区重力根本无法与它抗衡，流下来的牛奶又心甘情愿地爬了回去。

不过，故事并未到此为止。毛巾真正了不起的地方在于，它非常蓬松。如果只能靠自己的纤维去接触薄薄的水层，那么它根本不会有这么强的吸水能力。但由于毛巾非常蓬松，所以棉花纤维之间会形成大量气泡和狭窄的通道。水一旦进入这些通道就会被各个方向的纤维吸引。因为通道很窄，所以每一滴水都会找到可以附着的表面。蓬松的特性拓展了毛巾的表面积，所以它能吸收大量的水。

毛巾迅速吸干地面上的奶渍，微小的水分子在蓬松的毛巾里挤成一团，彼此碰撞。最底下的水分子紧抓彼此，跟着拥挤的伙伴们前进。已经吸附在棉花上的分子和身边的同伴手挽手，努力稳住自己的位置。刚

刚接触到干燥棉花的分子不顾一切地吸附在纤维上，带着后面的伙伴奋勇前进，向上填充结构之间的空隙。奶渍表面的水分子拉扯着正下方的同类，试图和其他水分子一起凝聚成球，向上攀爬。这就是毛细现象。

毛巾里的牛奶和地上的奶渍都会受到向下的重力，但在微观层面，一旦牛奶接触到干棉花里的无数小气囊，重力根本无法抗衡毛巾的吸附力。我不断移动、翻转毛巾，用相对干燥的地方继续擦拭，让它尽可能地多吸一点水。

水分子会彼此拉扯，在纤维的空隙之间执着地向上攀爬，直到无数气囊产生的引力加起来终于与重力达到平衡。正是这个原因，如果你把毛巾的边缘浸入水中，那么液体会沿着毛巾向上漫延几厘米，然后停止扩散。这时候，水受到的重力正好等于表面张力提供的向上的引力。纤维绒毛之间的通道越窄，能提供张力的表面积就越大，浸湿的水线也就爬得越高。在这种情况下，尺度真的很重要。把同样形状的绒毛放大100倍，那它就会彻底失去吸水的能力。不过，要是你把它缩小，各种力所占的优势就会改变，浸湿的水线也会继续升高。

最棒的是，如果你把毛巾晾到外面，那么绒毛缝隙中的水会慢慢蒸发，最后消失在空气中。这真是个完美的解决方案，毛巾不但能吸收液体，还能让这些液体无声无息地自行消失。[38]

清理完奶渍以后，我做好了苹果派，还把厨房收拾得干干净净。不过，最后我还是犯了一个错，这回科学知识帮不了我了。苹果派上的奶油霜味道不太对头，看着大家的表情，我终于意识到了这一点。我把波兰语里的酸奶油错当成了普通奶油。这下我可记住这个词了，但这也真丢人。不过，人总得活到老学到老，下次我不会再犯同样的错误。

我们为什么会用棉花做毛巾？因为棉花的主要成分是纤维素，这种物质的亲水性极强。脱脂棉、洗碗巾和廉价的纸都能吸水，因为它们都由亲水的纤维素组成，微观结构非常蓬松。问题在于：这些物理规则适用的尺度有下限吗？如果把绒毛之间的通道做得尽可能小，又会发生什么事情？实际上，我们要说的已经不再是吸水的工具，在这条路上，大自然比人类走得更远。主宰微观世界的物理规则与地球上体形最大的生物——巨型红杉——息息相关。

●

森林的静谧与潮湿仿佛亘古不变。树木之间的地面上长着厚厚一层苔藓和蕨类，除了看不见的鸟儿发出的鸣叫以外，你只能听见树木摇晃时发出的令人不安的嘎吱声。透过绿色枝叶的缝隙，我能看到高处的蓝天，而在我脚下的地面上，水无处不在：小溪、潮湿的水洼，还有沿着山谷蜿蜒向前的细流。前进的时候，我常常会下意识地紧张起来，不时会有一大片阴影出现在森林中，看起来与周围的环境格格不入。但那不是掠食者，而是一棵树：足有上千年树龄的大树屹立在孱弱的后辈之间，高耸的身躯在森林中投下巨大的阴影。

这就是海岸红杉，学名北美红杉。它曾郁郁葱葱地覆盖着加利福尼亚州北部的广袤领土。时至今日，这些巨树形成的森林已经急剧缩小，现在我拜访的正是久负盛名的洪堡县红杉国家公园（Redwood National Park, Humboldt County）。巨大的红杉之所以如此醒目，是因为它们的树干完全垂直于地面，笔直地伸向空中。这颗星球上已知最高的树木就生长在这里，它的高度达到了惊人的116米。[39]远足途中，我不时与胸径足有两米的巨树擦肩而过。最令人震惊的是，在那沟壑纵横、饱经沧桑的树皮下面，这些树还在继续长出新的年轮。它们还活着。我头顶100米外那些终年常绿的叶子正在吸收、储存太阳的能量，以制造新的养分，它们做的这些事情和其他小树没什么两样。

但是，生命需要水，而水在地面上，在我站立的地方。也就是说，在我周围，森林里的水正在我们看不见的地方向上流动。从树苗发芽的那一刻起，这样的流动就已经开始，从不曾间断。有的红杉从罗马帝国衰落的年代就已经生长在这里，它们一直矗立在加州的浓雾中，这期间人类发明了火药，成吉思汗横扫了亚洲，罗伯特·胡克出版了《显微图集》，日本人轰炸了珍珠港。上千年的时光中，树干里的水从不曾停止流动。我们如此肯定，是因为红杉体内依赖于水的一整套机制从未停止工作，这不可能暂停然后重启。这套生物输水结构十分精妙，它之所以有效，是因为输水管的直径只有几纳米。

树木的输水系统藏在木质部中，细小的管子贯通树干，从树根一直延伸到树梢的叶子里。我们所说的“木头”的主要成分就是这些小管子。

不过，随着树木长得越来越高大，最内层的树芯就会逐渐失去输水功能。毛巾吸水靠的是毛细现象，但这只能把水抽到几米的高度，对很高的树来说远远不够。树根也能产生一定的压力，推动管中的水沿着树干上升，但作用效果同样只有几米。红杉在输水上另有办法，它们的水不是推上去的，而是拉到高处的。所有树木都拥有类似的输水系统，但红杉的系统是当之无愧的头号精品。

我坐在一根倒卧的树干上，仰望身旁的巨树。在我头顶100米外，细碎的树叶在微风中招展。要完成光合作用，它们需要阳光、二氧化碳和水。空气中的二氧化碳通过每片树叶背面的小孔（气孔）进入树叶内部，这些气孔的内部有纤细的网络，交织着充满了水的通道。这是树木输水管道的末端，到达气孔之前，主输水管经过了多次分岔，每一次分岔都会让直径变得更小。

在这里，输水管终于接触到了空气，它的末端直径只有10纳米左右。[40]水分子紧紧吸附在每条通道的内壁上，水的表面向下凹陷，形成纳米尺度的“小碗”。阳光会加热树叶和叶子里的空气。当水面上的某个水分子获得了足够的能量，它就会脱离下面的伙伴，蒸发到空气中。可是现在，纳米尺度的碗变形了：因为失去了一个水分子，它凹陷得太深。表面张力向内拉扯水分子，让它们挤得更紧，以便进一步缩小表面积。有很多新的分子可以填补蒸发后形成的空隙，但它们都位于输水管深处。因此，输水管里的水会向上移动，去填补那个被蒸发掉的分子，由此引发连锁效应，层层传递到树干低处。单个输水管的直径很小，表面张力会对通道下方的水产生极强的拉力，无数叶子共同作用形成的合力足以拉动管道系统里的水从树根直抵树梢。这些水的确会受到向下的重力，但众多微弱的拉力汇聚起来，最终赢得了这场战斗。[41]向上的拉力不仅需要对抗重力，还需要克服管壁与水之间的摩擦力。

几棵小树苗簇拥在我周围，它们只有1岁，树干内的输水管道才刚刚开始成形。树苗越长越高，管道系统也随之伸展，但绝不会断裂，所以树叶背面的气孔总能得到输水系统的滋润。在树木的成长过程中，这套系统一刻不停地向上抽水保障供给。如果管道系统彻底空了，树木就无法再次往里面充水。在成长的过程中，树木会确保管道里的水长流不竭。不管树木长到多高，它都必须确保输水系统完好无损。最高的红杉

之所以都生长在海岸附近，是因为海滨的雾气能够帮助它们的叶子保持湿润。[42]这样一来，红杉就不需要从根部抽取那么多水了，这减轻了输水系统的负担，树木也因此长得更高。

水从树叶中蒸发的过程被称为“蒸腾作用”，在阳光的照射下，这个过程时时刻刻都在进行。宛如沉睡巨人一般的红杉实际上是数量惊人的一束水管，不断从森林的地下吸水，利用其中一部分水完成光合作用，再把剩下的水蒸发到天空中。每棵树都在做同样的事情。树木是地球生态系统不可或缺的一环，如果没有足够的水分，它们就无法向天空伸展。最美妙的是，它们不需要水泵就能完成抽水的任务。树木将问题化繁为简，利用微观世界的法则，将同样的过程重复数百万次，最终完成不可思议的任务。它们是活用物理学的巨匠。

那个由表面张力、毛细现象和黏性占据主导地位，重力和惯性退居幕后的微观世界一直是我们日常生活中密不可分的一部分。我们或许看不见那些过程，但能看到结果。那个世界精巧而陌生，很长时间以来，人类一直只能站在远处欣赏它，却无法深入其中，近年来，局面有了变化。针对毛细现象的研究一日千里。我们该如何操控狭窄管道中的流体？科学家甚至给这方面的研究专门起了个名字：微流体（microfluidics）。现在也许还有很多人完全没有听说过这个词语，但有朝一日，它必将对我们的生活产生重大影响，尤其是在医学领域。

今天，糖尿病患者可以用简单的电子设备和试纸监控血糖。微小的血滴一旦接触试纸就会被迅速吸收，这个过程背后就是毛细现象。葡萄糖氧化酶藏在试纸的小孔里，这种酶会与血液中的糖发生反应，产生一个电信号。病人可以利用手持设备探测到这个信号，然后，“嘀”——准确的血糖测量结果就会立即显示在屏幕上。这个过程看起来十分简单明了。试纸吸收血液，然后进行测量。但真的就这么简单吗？这样的描述实在过于粗略，真正发生的事情比这复杂精妙得多。

如果你能让液体通过细小的管道和纤维进入“储液罐”，并在流动过程中加入其他化学物质，再观察最后得到的结果，那么你就做成一个化学实验。这里不需要玻璃试管、手持式移液器和显微镜，科学家正在研发各种便携式的医学实验设备，这为“微型实验室”行业的迅猛发展奠定

了坚实的基础。谁也不愿意从自己身体里抽出一整管血，但一滴血的量又太少，处理起来很难。更小的诊断设备通常成本更低廉，分离血液也更轻松。你甚至不需要用到高分子聚合物或者半导体这类现代的高级原材料，有纸就行。

哈佛大学的一组研究人员正在乔治·怀特塞兹（George Whitesides）教授的带领下钻研此类课题。他们设计了一种诊断工具，主要部件就是邮票大小的试纸，上面以疏水材料分隔出很多亲水通道。只要将一滴血或一滴尿滴到试纸上正确的区域，毛细现象就会将液体分配给不同的测试区。每个测试区里都有某种特定生物测试所需的原料，而每一个“储液罐”都会根据测试结果而改变颜色。[43]

研究人员表示，哪怕是对医学一窍不通的人也能轻松完成测试，他可以用手机给试纸拍一张照片，然后通过电子邮件将照片远程发给有能力做出诊断的专家。这个想法的确相当美妙。纸成本低廉，这类设备不需要消耗能量，重量也很轻，完成测试之后，你只需要点火将它烧掉就能保证卫生和安全。不过，要让这些看似简单的设备真正投入使用，我们还需要确认、权衡很多东西。但是，我们有理由相信，无论如何，此类设备未来都必将在医学界占领一席之地。

本章的内容带来了一个启示：遇到问题的时候，我们或许应该先试着寻找最合适的尺度，尽量让问题变得更简单。换句话说，我们可以选择用哪些物理规则来解决问题。

微观世界真的很美妙！

第4章

时光中的一瞬

- 走向平衡 -

番茄酱和蜗牛

慵懒的周日，英式酒吧是解决午餐的最佳地点。我常常觉得这类地方既温馨又自然：古老的橡木梁柱间隐藏着众多形状各异的小空间。你在擦得闪闪发亮的黄铜脚炉和获奖小猪的照片之间找了张桌子坐下，点了一份标准的酒吧午餐。和餐盘一起端上来的通常还有一碗薯条和玻璃瓶装的番茄酱。不过接下来就费事了，几十年来，橡木房梁无数次见证了这项仪式：你得把玻璃瓶里的番茄酱倒出来才能蘸薯条，这可不是件易事。

起初，乐天派们只是把番茄酱瓶子倒过来举在薯条碗上方，结果当然什么都不会发生，但谁也不会跳过这一步。番茄酱非常黏稠，渺小的重力根本无法把它从瓶子里拽出来。而它之所以如此黏稠，原因有二：第一，只要够黏，那么就算瓶子已经放了很久，番茄酱里的香料也不会沉底，你要用的时候也不必再把它摇匀；第二，也是更重要的一点，人们喜欢在每根薯条上涂一层厚厚的酱，要是番茄酱很稀，那感觉就差多了。薯条上的黏稠酱汁令人愉悦，可是它还在瓶子里的时候，你的感觉就不那么愉快了。

几秒钟后，你终于和别人一样，开始相信重力根本奈何不了瓶子里的番茄酱。你只好摇晃玻璃瓶。你的动作越来越大，最后终于开始用另一只手使劲拍打瓶底。桌边的朋友们受不了这声响，纷纷往椅背上靠。一大坨番茄酱猝不及防地流了出来。奇怪的是，番茄酱真正动起来的时候分明相当轻快。现在，厚厚的酱汁覆盖了整个碗（或许还有半张桌子），这是最有力的证据。之前它还纹丝不动，突然之间就动若脱兔，这到底是怎么回事？

番茄酱的问题在于，如果你试图以很慢的速度去推动它，那么它就会表现得像固体一样；但要是你迫使它高速运动，它就会表现出液体的性质，可以流动。瓶子里和薯条上的番茄酱受到的向下的力只有微弱的重力，所以它就像固体一样死死赖在原地，可只要你摇晃得够狠，一旦番茄酱开始运动，它就会像液体一样快速流动。一切都是时机问题。虽然你做的是同样的事情，但动作快慢不同，造成的结果也会截然不同。

番茄酱的主要成分是过筛西红柿、醋和香料。混合物本身很稀，毫无特别之处，但在加入了0.5%的多糖之后，它就完全变了。这种糖名叫黄原胶，是一种常见的食品添加剂，由细菌发酵生成。玻璃瓶放在桌上的时候，水分之中的这些长长的糖分子彼此纠缠，维持着番茄酱的形态。而在我们摇晃瓶子的时候，它们开始松动，不过很快又会重新缠到一起。等到你开始拍打玻璃瓶，番茄酱受到的振动更加剧烈，纠缠在一起的分子不断分开，最后，它们纠缠的速度再也赶不上松脱的速度，一旦越过这个关键点，番茄酱就会失去类似固体的特性，哗啦啦一下子就从瓶子里涌出来。[44]

其实我们有办法解决这个问题。而且，考虑到英国人花了那么多时间来对付瓶子里的番茄酱，你会惊讶于这简单的解决方案竟然没几个人用。倒置瓶子、拍打瓶底，这些办法都收效甚微，因为只有离受力点最近的那部分番茄酱才会松动，而瓶颈会被黏稠的酱汁堵塞。最好的办法是让瓶颈处的番茄酱松动。你只需要将瓶子倾斜到一定角度，轻敲瓶颈，酱汁就会自己流出来，而且不会一下子出来一大堆，因为流动的酱汁数量有限。周围的用餐者不会被你的手肘撞到，也不会有番茄酱洒到他们身上，薯条也不会被番茄酱彻底淹没。

在物理学的世界里，时间非常重要，因为事情发生的速度会影响很多东西。如果你以两倍的速度去完成一件事，有时候能节省一半的时间。不过更常见的是，你会得到一个截然不同的结果。这一点很有用，我们也会运用这个原理以各种方式来控制周围的世界。时间尺度决定了事情的结果，这一点奇妙无穷。无论是对咖啡、鸽子还是高耸的建筑来说，时间都很重要，而不同的时间尺度对这些事物各有不同的意义。这一点不光会让我们的日常生活变得更加方便，有时候你甚至会发现，生命之所以存在，完全是因为物理学的世界总有些赶不上趟。不过，我们

还是从头说起吧，现在，我们一起来看一种以“永远赶不上趟”而著称的动物，它就是慢动作的代名词。



那天的剑桥阳光明媚，我不得不承认，我被一只蜗牛打败了。

很少有研究生在毕业前的最后一年花时间研究园艺，但当时我和三位朋友合租的那幢房子有一座花园，这样的诱惑实在太大。那一年，在工作和运动之余那稀少的时间里，我一直忙着清理繁茂的荨麻，在丛生的杂草中寻找大黄和玫瑰树之类的宝藏。父亲笑我在花园里种土豆（“你还真是波兰人。”他说），但我新开辟的菜地当然不会只种土豆。最让我激动的是，花园里甚至有个废弃的温室，里面铺满了碎石，还种了一架葡萄。春天我可以先在温室里培育幼苗（我打算种韭葱和甜菜根），然后把它们移植到菜地里。2月底，我在托盘里播下种子，然后开始等待新植物发芽。

不久后我就发现，幼苗恐怕是长不出来了，因为蜗牛实在太多。我拎着喷壶走进温室，发现每个托盘正中央都有一只趾高气扬的蜗牛。新翻开的泥土散落在周围，土壤中还有星星点点的绿意，那是被咬断的嫩芽。不肯服输的我把所有蜗牛都扔了出去，然后重新播种。这次我把所有托盘都放到了砖堆顶上，免得蜗牛再爬进去。两周后，刚发芽的幼苗又不见了，托盘里的蜗牛比上次还多。我又想了几个主意，但却无一奏效，最后我只剩下一个办法。这次我找了几对空花盆，把茶盘倒扣在每对花盆上，这时茶盘看起来活像长了两条菌柄的大蘑菇。我在所有茶盘边缘都涂了油，再把育种托盘放到“茶盘蘑菇”头上。经过这一系列复杂的操作以后，我把最后一批种子撒进托盘，合十祈祷，然后就回去继续研究凝聚态物理了。

幼苗不受打扰地长了半个多月，还是出事了：我在原本应该长着幼苗的地方发现了一只肥大快活的蜗牛。我还记得自己站在温室里疯狂地思考，它到底是从哪儿爬进托盘里的。只有两种可能：一、它沿着温室内墙爬到了屋顶上，然后不知怎么就正好掉进了托盘里。这个概率看起来相当渺茫。二、它沿着花盆壁爬到了倒扣的茶盘里，然后翻过茶盘边缘，一路闯进最上层的种子托盘。[45]无论如何，我都不得不承认，蜗

牛赢得了奖赏。但是，它是怎么做到的？这两条路线都要求它倒悬着爬行，它只能靠黏液把自己固定在物体的表面上。如果你观察过蜗牛移动，那么你会发现，它的前进方式和毛毛虫截然不同——蜗牛永远不会离开物体的表面，它只会不断分泌黏液，然后沿着黏液的路线前行。黏液就是蜗牛的秘密武器，而黏液的物理特性和番茄酱差不多。

观察蜗牛移动的时候你看不到太多东西，因为它的腹足边缘移动的速度非常慢。蜗牛分泌的黏液就像静止不动的番茄酱，黏稠而厚重，难以移动。不过就在蜗牛身体下方，在腹足的中央，肌肉从后往前运动，以推力迫使黏液流动起来。这些黏液会发生和番茄酱一样的变化，所以只要速度够快，它就会轻松地流动起来。借着肌肉的力量，蜗牛在液态的黏液表面滑行，几乎不会遇到任何阻力。蜗牛需要这层厚厚的黏液，否则它无从着力。蜗牛和蛞蝓之所以能移动，完全是因为它们分泌的黏液同时拥有固体和液体的特性，而这些黏液具体表现出什么特性是由外界施力所决定的。这种移动方式的最大优势在于，蜗牛可以借此头朝下脚朝上地爬行，因为它们永远不会离开自己所在的表面。

黏液为什么会有这种效果？因为它的成分是长长的复合糖分子。静止不动的时候，这些分子之间会连接在一起，赋予黏液固体的特性。但只要外界的推力够大，这些连接就会断裂，分子开始像意式细面一样交错滑动。等到黏液再次静止下来，连接重新成形，短短几秒后，它又会变得黏稠。

就算这些我全都知道，我又该怎么保护幼苗呢？显然，我无法阻止蜗牛爬进托盘，因为它的黏液几乎可以粘在任何一种表面上，包括不粘锅涂层。实验表明，就连滴水不沾的疏水性表面都无法让蜗牛止步。这真是个了不起的成就，不过心疼幼苗的我没有心情表达赞赏。

防滴涂料也是基于同样的原理。静止的涂料黏稠厚重，不过只要你用刷子把它抹开，它的黏稠度就会大大降低，让你能够轻轻松松地把它刷得很薄。一旦你挪开刷子，涂料的黏稠度就会立即恢复，所以在干掉之前，它不会顺着墙壁向下流淌。

极快和极慢

番茄酱和蜗牛都很渺小，但同样的物理学现象可能在更大的层面上引发严重的后果。2002年，我曾拜访过新西兰的基督城，那是一座宁静而优雅的城市。几千年来，雅芳河带来的无数小颗粒层层堆积，造就了肥沃的土地。但是，这座美丽的城市脚下却埋着一颗定时炸弹。2011年2月22日中午12点51分，一场6.3级的地震在距离市中心约10千米的位置爆发。地震本身就够糟糕了，有人被甩到空中，有的建筑物四分五裂，而更糟糕的是，组成城市地基的沉积物只有在静止状态下才有足够的强度。和番茄酱一样，这些颗粒在剧烈的晃动中变成了液体。当然，细节上还是略有不同，沉积物的流动性之所以会大大增强，并不是因为分子之间的连接遭到了破坏，而是因为水涌进沙粒之间，大大降低了土壤的摩擦力。不过，二者背后的物理学原理完全相同。固体的土地在剧烈的振动下像液体一样流动起来。

汽车很重，所以在重力作用下，它会向地面施加很大的压力。汽车之所以不会陷进地里，是因为坚固的地面可以抵挡这样的压力。不过在基督城地震爆发的那几分钟里，这条法则被打破了。那天有很多车停在路边的沙土地面上，这些沙土已经几十年没有移动过了。但随着地震的爆发，沙土层开始快速滑动。如果这个过程发生得很慢，那么停在地面上的车不会有危险，但一切来得如此迅速，水涌进沙粒之间，沙子无法留在原来的位置，被迫四散游走。土地突然变成了水和沙子的混合物，失去了稳定的结构。地面还在摇晃，停在这堆混合物上面的汽车开始下陷。不过，地震一停，只需要一两秒，大地就能平静下来，水慢慢退去，地面重新固定下来，但汽车已经被半埋在了土里。

正是这个原因，基督城在地震中损失惨重。地面支撑力不足造成了汽车下陷、建筑物倒塌，这种现象叫作“土壤液化”，只有地震这样强大的力量才能让沉积物达到足够的速度，造成这样的后果。不过，就算外力很小，只要沙质地面运动的速度够快，情况一样会很严重。因此，陷进流沙时千万不要拼命挣扎。你越挣扎，沙子的流动性就越强，你下沉的速度也就越快。你应该尽量放慢动作，努力尝试控制自己的姿态和位置。时间很重要，而速度就是时间的一种表现。改变速度往往会造成截然不同的结果。

要想形容某件事情发生得很快，我们常常会说“一眨眼的工夫”。人

类眨一次眼大约需要1/3秒，而人类的平均反应时间是1/4秒左右。这听起来似乎很短，可是你想一想标准反应测试的过程就会知道，这段时间里我们做了很多事情：光照到视网膜上，专门的感光分子就会开启一系列化学反应，产生一股微弱的电流。电信号通过视神经传向大脑，刺激脑细胞相互发送信号，判断是否需要做出反应。电信号还会沿着神经细胞传向肌肉。收到“收缩”指令后，肌纤维展开行动，让你的手按下按钮。这一切都是为了让你尽可能地以最快的速度做出反应。

我们为人体的复杂和精妙付出了速度的代价。我一直认为人类是动物界里的蜗牛，我们拖着迟缓的脚步在物理世界中踽踽前行，因为我们做的每一件事都牵涉许多不同的步骤。就在我们慢吞吞地处理这些琐事的时候，其他很多更简单的物理系统已经在瞬息间经历了巨大的变化。这些简单迅速的过程快得让我们根本无法察觉。将一滴牛奶从高处滴进咖啡杯里，你或许可以从中一瞥那个世界的运转。也许你能看到牛奶滴从水面上弹开，然后重新落回杯子里，这几乎是人类能分辨的速度的极限。在我念博士的时候，我的导师就曾说过，要是你的动作够快，你完全可以在牛奶滴进杯子之前改变主意，在半空中接住那滴牛奶；不过我敢肯定，这样的事儿人类完全不可能做到，我们需要一个小得多、快得多的帮手。

人类因为慢而错过了多少东西？这个问题启迪了我的博士生涯。我总是忍不住去想，世界上有多少事情就发生在我的眼皮子底下，但它们要么太小，要么太快，总之我都看不见。所以我选择了一个能让我摆弄高速摄像机的博士课题，这种技术能让我看到那个在正常情况下快得完全看不见的世界。但只有人类才能使用高速摄像机，如果你是一只鸽子，那又该怎么办呢？

巴里·弗罗斯特（Barrie Frost）是一位锐意进取的科学家，1977年，他设法教会了一只鸽子使用跑步机。要是在今天，他的研究很可能会入选搞笑诺贝尔奖。这样奇怪的研究会让你先是忍俊不禁，然后陷入深思。跑步机的履带缓缓向后移动，为了保持自己原先的位置，鸟儿不得不迈步前进。显然，鸽子很快就领会了这一点，但它向前走的时候却出了点问题。

如果你曾坐在城市广场旁观察四处觅食的鸽子，你会发现它们在行走的时候头总会前后摆动。我一直觉得这样肯定很难受，这看起来也很奇怪，鸽子为什么要做这样的无用功呢？跑步机上的鸽子就完全不会点头。巴里由此推断，点头的动作对鸽子来说肯定别有深意。显然，它们不需要点头也能行走，所以这与运动完全无关，我们应该从视觉的方向去考虑。跑步机上的鸽子虽然在走，但周围的环境却固定不变。如果鸽子的头一直不动，那么它在任一时刻看到的东西也完全一样。这样的环境清晰而易于观察。而鸽子在地面上行走的时候，周围的场景会随着它的脚步发生变化。

事情似乎是这样的：这些鸟儿看的速度不够“快”，无法捕捉变化的场景，所以它们实际上并不是在前后摆头，而是先把头往前探一点，然后身体跟上，最后头向后摆动。在它迈出这一步的过程中，头的位置基本保持不变，这样它才有更多时间分析眼前的景象，然后再迈出下一步。它们先给周围的景象拍一张“快照”，然后探头向前，拍摄下一张快照。要是你能盯着一只鸽子观察一会儿，你一定会觉得我说得很有道理（不过这需要一点耐心，因为鸽子的动作通常很快）。[46]为什么某些鸟类搜集视觉信息的速度特别慢，以至于必须前后摆头，但其他鸟儿却不用这样？谁也不知道这个问题的确切答案。但有一点毋庸置疑：速度较慢的动物必须把世界分割成一帧帧的静止画面，才能跟得上外界的变化。

人类的眼睛基本跟得上行走的速度，但如果在走路或者奔跑的时候要仔细查看近处的东西，你总得停下脚步才能看个清楚。你的眼睛无法在移动中以足够快的速度搜集所有细节。实际上，人类处理这个问题的方法和鸽子一模一样（虽然我们不会前后摆头），只不过我们的大脑会把所有东西拼成完整的画面，所以就连我们自己也无法察觉到这一点。我们的眼睛总在迅速地从某个点跳跃到下一个点，眼神的每一次停留都会为你的脑内画面增添更多信息。如果你在照镜子的时候集中注意力观察镜子里自己的一只眼睛，然后再把视线焦点转到另一只眼睛，你会发现在这个过程中，你根本看不到自己的眼睛有任何动作，但要是有个人站在你的旁边，他会清晰地看到你眼珠的转动。大脑将你看到的画面天衣无缝地拼接在一起，所以你根本不会发现自己的视线发生了跳跃，但

这样的跳跃时时刻刻都在发生。

重点在于，我们的速度比鸽子快不了多少，所以这个世界上一定有很多东西的速度比我们快。我们已经习惯了局限于某个时间尺度之内的生活——从1秒到几年——但真正的世界比这辽阔得多。如果没有科学的帮助，那么我们永远看不见以毫秒和千年为单位的世界，只能困在目前这个狭小的中间地带里。计算机之所以功能强大，甚至有神秘感，也是因为我们有这种需要。计算机能在极短的时间内处理大量数据，所以它们能在瞬息之间完成非常复杂的任务。计算机的速度还在持续提升，但我们对此却没有直观的感受，因为对人类来说，百万分之一秒和十亿分之一秒并无区别，全都快得无法分辨。不过，即便如此也不能抹杀二者之间的巨大差距。

观察的时间尺度决定了你看到的景象。要理解这样的相对性，我们不妨比较一下雨滴和山：前者速度极快，而后者基本纹丝不动。

一颗较大的雨滴能在1秒内坠落6米，大约相当于两层楼的高度。在这1秒之内发生了什么？雨滴由大量互相推挤碰撞的水分子组成，每个水分子都会和别的水分子抱团，而外面总有力量想拆散它们。

正如我们在第2章中看到的，一个水分子由一个氧原子和两个氢原子组成，两个氢原子分别位于氧原子两侧，三者组成V形。水滴由数十亿个完全相同的水分子组成，每个水分子都在这个松散的网络中不停地跳跃、压缩、拉伸。在这1秒钟里，某个分子可能会跳跃2000亿次。运动到边缘的分子会发现外面没有任何力量可以抗衡水分子之间的吸引，所以它还会被拉回雨滴中央。漫画中常见的雨滴形状完全出自想象：现实中的雨滴可能形状各异，但绝不会有尖角。雨滴边缘的任何尖角都会被迅速抹平，因为单个分子根本无法对抗整颗雨滴的拉力。不过，尽管这种向内的拉力非常强大，但雨滴的形状永远不可能达到完美，因为在空气阻力的影响下，它必须不断地调整自己。雨滴可能会被压扁，不过它很快就会回弹，过度的回弹可能把它拉成橄榄球的形状，然后再次被压扁，这个过程在1秒之内可能会重复170次。试图扯碎雨滴的外力和它内部的引力来回撕扯，雨滴的形状也随之不断变化。有时候，坠落到薄饼上的雨滴会在瞬间被压扁，然后它会扩散成一层薄薄的伞面，最后化

为无数细小的水滴。这一切都发生在1秒以内。虽然我们看不见，但雨滴在眨眼之间就会变化数十亿次。最后，这一滴雨溅落在裸露的岩石上，观察的时间尺度也随之改变。

这是一块花岗岩，自人类诞生以来它就没有动过，也不曾有过任何变化。但在4亿年前，南半球曾经矗立着一座巨大的火山，来自地底深处的岩浆挤进火山岩的缝隙之中，接下来的漫长岁月里，这些岩浆逐渐冷却下来，慢慢分离，形成各种晶体，最后变成了坚不可摧的花岗岩。时间继续流逝，宏伟嶙峋的岩山经受了冰川期的摧残，植物、冰雪和风雨不断侵蚀打磨着它的形状。火山逐渐被削平，在这个过程中，它也在不断移动。一场剧烈的爆炸之后，这一大块土地开始慢慢漂向北方。地质年代变迁，物种兴亡交替，看不见的力量支配着地球表面板块的聚散。时至今日，这颗行星的生命已经走过了1/10，那座曾经剧烈活动的火山变成了凄凉的遗迹，原本埋藏在地底深处的岩石暴露在光天化日之下。它就是本尼维斯山，不列颠群岛的最高峰。

单独观察雨滴和山的时候，你很难发现任何变化。但这只是因为我们对时间的感知能力有限，不是因为它们真的一成不变。

我们生活在时间尺度的中间地带，所以有时候，你很难认真去思考这个尺度以外的事情。这里要说的不光是“现在”与“过去”的区别，还包括“现在”这个词的确切定义：它可以指此时此刻，也可以指最近几年。极快和极慢的事件需要的观察视角当然大相径庭，但这样的区别与事物发生变化的方式无关，只与变化的速度有关。还有，变化的“结果”是什么呢？所谓的“结果”通常指的是某种平衡的状态。如果没有外力作用，事物将永远保持原有状态，因为它没有变化的理由。最后，没有力，也没有运动，所有事物达到平衡，整个物理世界终将走向唯一注定的命运：平衡。

船闸和大坝

想象一下，某条运河里有一套船闸，人们修建它的理由非常新颖：为了让船从河里爬到山上。这个壮举之所以能实现，是因为船的动力设施可以驱动它逆水而行——但水流的速度不能太快。无论什么船都不能

迎着瀑布前进，但在船闸的帮助下，你可以让船爬山。

一套船闸由两道闸门组成，这两道门之间会形成一段独立的湖泊。船闸一侧的水位较高，另一侧的水位较低。无论是逆流而上还是顺流而下，在运河上行驶的所有船只都必须通过这两道闸门。我们不妨假设，现在正好有一条船在船闸下游等待。两道闸门之间的初始水位与河流下游的水位相同，此时人们打开下游的闸门，让船逆流而上进入两道闸门之间，然后关闭闸门。接下来，上游的闸门开了一条缝，水开始流进两道闸门之间，这一步非常关键。上游闸门关闭的时候，闸门以上的水无处可去，只能尽量停留在低处以保持平衡。此时上游的水体处于静止状态。但是，一旦闸门打开，上游的水体与下游连通，它立即就会发生变化。突然之间，水有了更好的出路。在重力作用下，水总会往低处流动，我们只需要打开闸门，它就会听从重力的召唤一泻而下。所以，上游河水进入两道闸门之间，托着船只上浮，直至船闸内部水位与上游水位相等。我们什么也不必做，只需要打开那道通往新平衡状态的门。现在，船只已经达到了运河上游水位的高度，等到船闸完全打开，它就可以沿着缓慢流动的运河逆流而上。在它身后，等到闸门再次关闭，一切又恢复了平衡。船闸内部的水将保持原状，因为它无处可去。所有力达到平衡。然后，等到下一艘船从上游进入船闸，人们又会打开下游闸门把水放出去，达到新的平衡。

这个故事告诉我们，通过控制平衡态的位置，我们可以做很多事情。在没有外力干扰的情况下，事物总会自我调整到平衡态，然后停留在这个状态。我们可以通过调整平衡态来达到自己的目的。但我们需要先了解其中的规则，才能保证一切尽在掌握。

物理学的世界总是趋于平衡：冷热不均的液体总会充分混合，直至温度均衡；气球总会膨胀，直至内外压力相等。这个判断与时间的单向流动息息相关。世界不可能倒退，水永远不会倒流，这意味着你只需要观察各个系统如何趋于平衡，就能判断哪边是前，哪边是后。靠蛮力推动事物需要消耗许多能量，相比之下，设法调整平衡的速度要省力得多，而且通常很管用。

●

胡佛水坝可能是20世纪规模最大的民用工程项目。从拉斯维加斯驱车前往水坝的路上，你将经过一片裸露的红色岩原。只有水的蓝色反光偶尔会在沙漠中央一闪而过，提醒你附近可能藏着某些非同寻常的东西。然后，你转了个弯，那个重达750万吨的庞然大物突然出现在你眼前，楔形的巨大水泥构造嵌在崎岖的山体之间。

100年前，科罗拉多河曾在狭窄的河谷中无拘无束地流淌。来自上游落基山脉和东部广阔平原的雨水沿着一道道山谷汇入加利福尼亚湾。困扰下游农民和城市居民的不是水量——水量总是充足的——而是这些水到来的时机。春天，汹涌的洪水会横扫大片土地，可是到了秋天，河道里只剩下可怜的涓涓细流，完全无法满足日益增长的人口的用水需求。水的起源地和入海口总是固定不变的，农民和市民真正需要控制的是河水到达某地的具体时间，[47]最重要的是阻止大量的水在短时间内积累。于是，人们修建了这座大坝。

来自落基山和大峡谷的河水现在全部汇入了大坝上游的米德湖巨型水库。它们无处可去，至少暂时如此。最重要的是，这些水停留在高处，因为它们无法继续向下流动。1930年，大峡谷里的一滴水可能要下降150米才会停止运动，但在1935年大坝竣工以后，一滴水在离谷底150米的高度就能达到平衡态。最了不起的一点是，我们不需要消耗任何能量就能让它停留在这里，我们只需要精心构筑屏障，阻止它流向别的地方。我们将它固定在了人类创造出来的平衡态里。

当然，我们也可以让它去往别处。人类可以通过大坝控制河流，调整科罗拉多河下游的流量，让这一带不再有洪水和断流。除此以外，还有其他好处。水流通过大坝时产生的巨大力量可以用来发电。在美国西南部的这片不毛之地里，这些水支持了数十万人的工作和生活。

人们修建胡佛水坝是为了控制水流的时机，但它背后的原理还有更广泛的用途，绝不仅仅局限于治水。要收集能源，我们惯常的做法是在能源流动的路径上设置障碍。物理世界总是趋向于平衡，但有时候我们可以控制最近的平衡态的位置，以及事物达到这个平衡态的速度。控制了能量的流动，也就控制了释放能量的时机。然后，我们设法让能量通过人工设置的障碍流向平衡态，并在这个过程中对它加以利用。我们既

不创造能量也不毁灭能量，我们只会改变它流动的方向和速度。

和古代文明一样，我们也面临着资源有限的问题。植物形成的化石燃料能量实际上来自太阳，要是没有植物的转化，这些能量只能变成无法利用的微弱热量，就像流入平原的水一样。化石燃料像一座大坝，它将能量截留在临时的平衡态中。我们把这些燃料挖出来，对它进行适当的催化，为能量提供一条通往另一种平衡态的路径（以火焰和化学将燃料转化为二氧化碳和水），从而控制了能量释放的时机。我们面临的问题是，化石燃料中储存的“上游”资源只有这么多，近年来我们已经释放了亿万年来积攒的大量能量。化石燃料的宝库日渐枯竭，重新补充库存需要亿万年的时间。所以现在，我们正在努力开发各种各样的可再生能源，胡佛水坝的水电站就是一例，尽管从本质上说，这些能量的源头都是太阳能。我们的文明面临的挑战自始至终不曾改变：如何有效地保存和重启能量流，在尽量不改变世界的前提下办成尽可能多的事情。

下次当你打开某件由电池驱动的设备时，请记住，按下开关的时候，你实际上是在选择能量从电池中释放的时机，引导能量进入设备电路，帮助你去做有用的事情。完成任务以后，能量会以热的形式释放，这是它唯一的归宿。世界上的所有开关作用完全相同，它们控制着流动的时机，而流动总是趋于平衡。不同的流速也会带来不同的结果。在这里，时间很重要，因为它只有一个方向。我们通过选择时机和速度来掌控世界。但有时候，事物在达到平衡后不会停下来。如果一切发生得很快，那么平衡可能会再次被打破，这将引发一系列新的现象，甚至会造成问题。

晃动的茶水和喘息的狗

在工作日里，我一定会安排好下午茶时间。但最近我发现，哪怕倒一杯茶也会拖慢我的脚步，这不仅仅是因为烧水需要时间。我在伦敦大学学院（University College London）的办公室位于一条长走廊的尽头，而茶水间在走廊另一头。端着满满一杯茶缓步走回办公室是我一天中最慢的时刻（正常情况下，我工作时的步调总是介于“小跑”和“冲刺”之间）。这并不是因为杯子里的茶倒得太满，而是因为水面会晃。你每走一步，水面都会荡漾得更厉害。任何有理智的人都会觉得放慢脚步

是个合理的解决方案，但物理学家就会做个实验，看看这到底是不是唯一的解决方案。你永远不知道自己可能发现什么。我至少要尝试一下才能甘心接受看似一目了然的结果。

如果你把水装进一个杯子里，然后把杯子放在平坦的表面上，轻轻推它一下，水面立即就会开始荡漾。实际发生的事情是这样的：当你推动杯子的时候，杯子动了，水却停留在原地，所以水面会沿着被你推动的杯壁上升。现在，杯子里一侧的水面高于另一侧，重力会促使水往低处流动，所以另一侧的水面也被抬了起来。有那么一个瞬间，杯子里的水恢复了水平，但它没有理由停止运动，于是水继续涌向另一侧。重力总会把水从高处拉向低处，但它需要一点时间才能让水静止下来，等到水停止运动，这一侧的水面又比原来那侧更高，于是运动再次开始。如果放置杯子的表面足够平坦，那么荡漾的水面会逐渐平息下来，杯子里的水恢复平衡。但要是你一直在带着杯子走动，那就是另一回事了。

问题就在于晃动的频率。如果换几个大小不同的杯子来做同样的实验，你会发现水面荡漾的方式大体相同，但小杯子里的水晃得快，大杯子里的水晃得慢。无论你最初施加的推力有多大，同一个杯子里的水每秒荡漾的次数总是相同的，杯子的直径是水体荡漾频率最重要的影响因素。

向下的重力始终趋向于让一切恢复平衡，而液体的运动速度总在水面刚刚越过平衡位置时达到最大值，这二者之间存在冲突。如果杯子比较大，那么运动的液体就更多，行程更长，每次晃动需要的时间也就越多。每个杯子里的水都有独特的摇晃频率，也就是杯子的固有频率。如果你只是施加一个最初的推力，然后任由它自行恢复平衡，那么你总会得到同一个频率。

我在办公室里摆弄了一会儿大大小小的杯子。有个印着牛顿头像的小杯子直径只有4厘米，这个杯子里的水每秒大约会摇晃5个来回；最大的杯子直径约10厘米，它每秒只会摇晃3次。这个大杯子很便宜，而且又旧又难看，不讨人喜欢。但我一直留着它，因为有时候你就是需要一大杯茶。

当我端着满满的茶杯离开茶水间，沿着走廊快速走了几步以后，杯

子里的水开始晃了。要是我不想把茶弄洒，那我就不能让它晃得太厉害。这真是个难题。在我行走的时候，杯子难免会发生轻微的摇晃，要是这个摇晃的频率正好契合杯子的固有频率，那么水面荡漾的幅度就会越来越大。这就像和孩子一起玩秋千，要是你推动秋千的节奏正好契合秋千摆动的频率，那么秋千就会越荡越高。杯子里的茶也一样。这种现象叫作“共振”。外界的推力越接近荡漾的固有频率，茶就越容易洒出来。所有渴得要命的人都面临着一个共同的难题：人类行走造成的晃动，其频率恰好就和普通杯子的固有频率相当接近。你走得越快，就越契合杯子的固有频率。这套系统简直就是逼着我放慢脚步，虽然实际上这只是个烦人的巧合。

于是我们发现，这个问题没有圆满的解决方案。要是我改用小杯子，那么相对于我走路的速度来说，它的固有频率实在太快，所以水面荡漾的幅度不会越来越大，茶也很难洒出来，但那么一点点茶根本不够我喝。可要是改用更大的杯子，我习惯的步调就和它的固有频率非常接近，走不出三步，茶必然会洒。唯一的办法就是放慢脚步，让我的步调变得远低于杯子的固有频率。[48]我很高兴自己进行了这番尝试，但这件事告诉我们，你奈何不了依赖于时间的物理现象。

一切摇晃（振动）的物体都有自己的固有频率。固有频率由物体本身的特性决定，与外界推力、运动速度等因素无关。荡秋千的孩子就是个例子，类似的例子还有钟摆、节拍器、摇椅和音叉。如果你背的购物袋摇晃的频率似乎和你的脚步不太合拍，那只是因为它的固有频率和你的步调有所差别。大钟的声音低沉，因为较大的尺寸决定了它们需要更长的时间来完成挤压—拉伸—挤压的循环，所以大钟的声音频率更低。我们可以通过聆听来大致判断物体的尺寸，这是因为尺寸会影响物体振动的频率。

这些特殊的时间尺度对我们来说真的都很重要，因为我们可以利用这些知识控制世界。要想抑制振幅，你在施加推力时就必须错开物体的固有频率。这就是茶杯的游戏。但是，要想不费力气地助推一把，就得顺应物体的固有频率。窥破天机的不仅仅是人类，狗也会利用这一点。

小狗因卡专心致志地盯着网球，就像等待发令枪打响的短跑运动

员。我把网球放在塑胶棒上甩出去，它立即紧张起来。下一个瞬间，网球从它头顶飞过，因卡跟在后面轻盈地蹿了出去，仿佛拥有无穷无尽的精力。小狗在茂盛的草地上高兴地追逐网球，我和它的主人坎贝尔聊了会儿天。因卡没有把网球叼回来，因为它嘴里已经有一个球了（显然，小猎犬就是这德行），不过追上球以后，它一直警惕地守在旁边，直到我们追上去取出它嘴里的网球，然后把球再次丢了出去。不停地追逐了半个小时以后，因卡终于快活地摇着尾巴坐了下来，气喘吁吁地抬头望向我们。

我跪下来摸了摸它的背。跑了这么半天，因卡浑身发烫。它没有出汗，因为狗不会出汗，但它仍然需要排出多余的热量。它张开嘴巴不停喘气，看起来相当辛苦，似乎需要消耗大量能量，进而产生更多的热，这好像有点自相矛盾。我的思绪丝毫没有影响因卡，有人摸它的背，它看起来倒是很开心，一串唾液从它大张的嘴巴边上流了下来。每次跑完步，我的呼吸总要过上好一会儿才能平静下来，但因卡很快就不再大口喘气。面对那双棕色的大眼睛，我不由得好奇：在重新开始追逐网球之前，它需要多少休息时间？

目前据我们所知，蒸发水分是最有效的散热方式，所以人类才会出汗。液态水转化为气态会带走大量能量，蒸发形成的气体还会自行飘走，不留任何痕迹。因为狗不会流汗，所以它们无法在皮肤上产生可蒸发的水，但它们的鼻腔内部却很湿润。狗大口喘气，尽可能地排出鼻腔里的湿润空气，这就是它们快速散热的方式。好像是为了证明这一点，因卡很快又开始大口喘气了。我数了一下，它大约每秒钟会喘3次，看起来的确很辛苦。但狗狗真正聪明的地方在于，它们喘气的时候其实不怎么费劲。

因卡的肺仿佛处在振动中，对于小狗来说，1秒钟呼吸3次效率最高，因为这正是它的肺的固有频率。吸气时肺壁扩张，片刻之后肺壁回弹，如此周而复始。因卡只需要一点力气，就能让肺恢复原有尺寸，接着进行下一轮喘息。不利的一面在于，在这么快的呼吸频率下，因卡的肺无法彻底完成与外界的气体交换，所以实际上它得不到多少额外的氧气。因此，它不会一直这样剧烈喘气。不过此时此刻，散热需求暂时抑制了它对氧气的需求，所以因卡大口喘气，让自己的呼吸频率贴近肺的

固有频率，同时尽量通过鼻子吸入更多空气。相对于散发掉的热量而言，喘气产生的热量少得可以忽略不计。它通过鼻子吸气，同时张大嘴巴，因为滴落的口水也有冷却作用，唾液蒸发也能辅助散热。现在因卡已经不再大口喘气了，它盯上了扔在一边的网球。只消一个眼神，训练有素的因卡就已心领神会，游戏再次开始了。

形状和材质都会影响物体的固有频率，不过最重要的影响因素是物体的尺寸。体形较小的狗喘气的速度更快，因为它们的肺更小，固有频率更高。对于体形较小的动物来说，喘气是一种相当高效的散热方式。体形越大，喘气散热的效率就越低，可能正因如此，大型动物普遍通过出汗来散热，尤其是那些没有毛的动物，比如我们人类。



每件物体都有自己的固有频率。振动的模式不止一种，同一件物品通常拥有多个固有频率。物体越大，它的固有频率就越低。你可能需要花费很大的力气才能推动一个巨大的物体，但就连建筑物也会振动，只不过它们的振动非常非常缓慢。事实上，建筑物有些类似节拍器，或者倒过来的钟摆——它的地基是固定的，但顶部会摆动。高处的风总比地面来得猛烈，有时候风的力量足以晃动细高的建筑物，甚至能达到它们的固有频率。如果你曾在大风天待在高层建筑里，你或许体验过这样的晃动。建筑物摇晃的循环周期可能长达几秒，待在里面的人难免会感到不安，所以建筑师花了很多时间来研究如何抑制这样的摇晃。他们不可能让大楼完全不晃，但可以改变建筑物的固有频率和柔韧性，尽量减轻摇晃。如果你感觉脚下的楼正在晃，不要担心——这样的晃动在设计允许的范围内，楼不会塌的。

风或许时强时弱，但它摇晃建筑物的节奏不太可能正好等于大楼的固有频率，所以楼体摇晃的幅度不会太大。但地震带来的振动又是另一回事了，强烈的地震波从震中出发，如涟漪般向外扩散，缓慢地摇撼大地。高耸的建筑物遇到地震时又会发生什么？

墨西哥城和台北101大厦

1985年9月19日清晨，墨西哥城开始摇晃。350千米外，几大构造板块在太平洋边缘挤压碰撞，带来了一场里氏8.0级的大地震。墨西哥城摇晃了三四分钟，地震撕裂了这座城市。根据估算，有10000人在地震中丧生，城市的基础设施也遭到了严重的破坏。恢复重建耗费了数年之久。美国国家标准局（U.S. National Bureau of Standards）和美国地质勘探局（U.S. Geological Survey）派遣了四位工程师和一位地震学家前去调查损失情况。他们发回的详细报告表明，最惨重的损失源自巧合带来的共振。

墨西哥城矗立在湖床的沉积物上，下面是坚硬的岩石盆地。科学家们在地震监控设备上看到了一道十分规律的波，完全不像地震带来的杂乱波形。我们发现，湖底沉积物的地质构造赋予了它特殊的固有频率，恰好和350千米外传来的地震波产生了共振。整个湖床以几乎完全一致的频率摇晃，宛如一个整体。

这已经够糟糕了，但在深入调查具体损失的时候，工程师还发现，大多数倒塌或严重受损的建筑物高度都介于5层和20层之间。很多更高和更矮的建筑物都不受影响。人们最后计算得出，地震的频率差不多契合中等大小建筑物的固有频率。地震以恰到好处的频率持续了一段时间，这些建筑就像音叉一样振动起来，无一幸免。

近年来，建筑师越发关注如何控制建筑物的固有频率。为了解决这个问题，人们有时候甚至会采用非常隆重的方式。中国台湾的台北101大厦修建于2004年至2010年，这幢高达509米的大楼是世界上最高的建筑物，[49]楼里最引人注目的无疑是87楼到92楼的观景区。在这里可以看到大楼的一个中空区域，里面装着一个重达660吨的金色球摆，看起来美丽而怪异，但它非常实用。

这个大球不是什么古怪的装置艺术，而是帮助大楼抵抗地震的安全设施，它的学名叫作“调谐质块阻尼器”。台湾地区地震频发，一旦发生地震，大楼和金球会各自独立地摇晃。开始，大楼向一侧倾斜，带动金球运动，但是等到金球自己动起来，大楼已经开始向反方向运动。这样周而复始，二者的运动方向始终相反，可以有所抵消。这个大球能向任意方向移动1.5米，它能将大楼的晃动减少40%。[50]要是大楼完全不

动，里面的人会感觉舒适得多。但地震会打破建筑物的平衡态，让它不得不晃动。建筑师无法阻止大楼晃动，只能尽量抑制晃动的程度。大楼里的人别无选择，只能坐在来回摇晃的高楼里安心等待，直到地震能量耗尽，一切重新平静下来。



物理世界总会趋向于平衡态，这是一条基本的物理学定律，人们称之为“热力学第二定律”。但这条定律并没有描述事物达到平衡需要多少时间。任何能量的注入都会促使事物偏离平衡，开始寻找新的平衡。生命之所以会存在，是因为生物总会利用这个原理来控制事物走向平衡的时间，从而掌握能量的去向。

就算住在大城市里，你的生活中也一定会有各种植物。透过厨房的窗户，我能看到明亮的阳光照耀着露台上的生菜苗、草莓等各种草本植物。木质地板会吸收直射的阳光并将之转化为热量，这些热量最终又会通过空气和建筑物流向别处。平衡来得很快，在这个过程中，一切都是那么顺理成章。

但洒在香菜叶子上的阳光却有不同的遭遇，它闯进了一间工厂。这些阳光不会直接转化成热量，而是以能量的形式服务于光合作用。植物利用阳光打破了叶子里某些物质的平衡态，通过这种方式将能量储存在自己体内。植物截断了能量流向平衡态的最短路径，然后开始分步利用这些能量。它们生出了类似化学电池的物质，利用这些物质将二氧化碳和水转化成糖。它们仿佛拥有一条流淌着能量的运河，河道情况异常复杂，有船闸，有交叉口，也有瀑布和水车。控制了能量流经每段河道的速度，就可以控制这里的所有能量。河道并非畅通无阻，能量也无法一下子从起点流到终点，而是会沿途帮助植物制造复杂的分子。这个过程并不平衡，但植物可以把能量临时储存起来，然后开启通往平衡之路的下一个步骤，如此稳步推进。只要有阳光照在香菜叶子上，它就会为这间欣欣向荣的工厂提供动力。不断注入的能量推动着不断变化的目标，但系统始终向着平衡态前进。最后我吃掉了那棵香菜，于是这部分能量又注入了我的系统。这些能量推动我的身体偏离平衡，只要我还在进食，平衡就无法恢复。不过我可以选择在什么时间进食，我的身体也可

以选择在什么时候使用这些能量，这就是我们体内的“船闸”。

这颗星球上的生命如此繁多，然而直到今天我们仍无法准确定义“生命”。我们可以凭直觉判断某样东西有没有生命，但若是想用某个简单的规则来定义这个概念，那就总免不了会有一两个例外。生命必须能够维持某个不平衡的状态，并利用这种状态来支持复杂的分子工厂，最终借此完成自我复制和演化。生命能够控制能量在自身系统中流动的速度，它通过控制能量流来维持自身的存在。从这个角度来说，处于平衡态的事物一定不是活的。这意味着“不平衡”的概念构成了当代两大谜团的基石：生命从何而来？宇宙中的其他地方有生命吗？

目前，科学家认为，生命或许诞生在37亿年前的深海热泉之中。这些热泉喷发温暖的碱性水，外面则是温度较低的弱酸性海水。两种水在热泉的出口混合，达到平衡，最早的生命可能就诞生在走向平衡的过程中。这里仿佛有一道船闸，趋于平衡的流改变了方向，构建出最早的生物分子。接着，第一道“关卡”演化成了细胞膜，它是所有细胞与外界之间的城墙，墙内是生命，而墙外不是。最早的细胞之所以能获得成功，是因为它暂时延缓了平衡态的到来，并由此打开了通往繁复美丽的生物世界的大门。或许其他星球上也会发生同样的事情。

宇宙中的其他地方很可能也存在生命。浩渺的太空中有那么多携带行星的恒星，每颗星球各有独特的环境。无论形成的条件多么苛刻，生命一定会在其他地方出现。但地外生命不太可能通过无线电信号和我们打招呼。撇开别的因素不论，宇宙如此广阔，等我们收到信号的时候，发射信号的地外文明可能早已消亡，何况有能力向宇宙发送信号的文明本身就已是凤毛麟角。

夏威夷的冒纳基山顶上矗立着两座望远镜，它们安放在两座巨大的白色圆形建筑里，在山上比邻而立。第一眼看到这两座穹顶的时候，我觉得它们活像是一对凝望宇宙的巨型蛙眼。未来，凯克天文台（Keck Observatory）的巨大眼珠可能会帮助我们捕捉到太阳系外生命的第一缕痕迹。载有地外生命的行星绕着自己的恒星转动，恒星的光穿过大气，会在光谱中留下独特的“指纹”。凯克天文台的望远镜捕捉的正是这类指纹，不久后它们也许就能探测遥远行星的大气成分，比如，大气里是否

有过多的氧或者过多的甲烷……这些失衡的迹象可能意味着该行星存在生命。我们也许永远无法确定，但这至少是人类有史以来想出的最可靠的寻找地外生命的方法：世界总会趋于平衡，如果能够确定它走向平衡的速度遭到了外力干预，这方面的证据或许会帮助我们找到正在演化的生命。

第5章

涟漪的故事

- 从水波到无线网络 -

浪花

去海滩上玩的时候，谁也不会长时间背对大海，否则就会感觉很不对头。我们不愿错过壮丽的海景，希望看到起伏的海浪。海水不知疲倦地拍打海岸，这景象总会让人莫名地感到心安，大海与陆地的交界在这个过程中不断变化。

住在加州拉荷亚海滩附近的时候，漫长的一天结束后，我最享受的事情就是沿着海滩漫步，坐在岩石上欣赏夕阳下的海浪。只要离开岸边100米，海浪的起伏就已变得轻柔绵长，几乎算得上波澜不兴。离海岸线越近，浪头就越高越猛，最后几乎是恶狠狠地砸在沙滩上。每一波海浪都是全新的，这样的景象我可以不厌其烦地看上好几个小时。

我们都认识波浪，但真要描述它的话，似乎又不那么容易。海岸边的波浪是水面上一串串起伏不定的“凸起”，它们翻涌不息，从一个地方涌向另一个地方。我们可以观察两道海浪之间的距离和浪峰本身的高度，借此来描述这些波的特征。小的水波是你想把茶吹凉时激起的涟漪，而大的水波足以盖过一艘船。

不过，所有波浪都拥有一个奇怪的特征，在拉荷亚，鹈鹕让我们清晰地看到了这一点。拉荷亚的海岸边生活着大量褐鹈鹕，这些鸟儿的外形颇具古风，让人不由得怀疑它们是从几百万年前穿越虫洞飞到这里来的。褐鹈鹕的喙长得惊人，而且总是紧贴身体折叠起来。人们常常看见这些奇怪的鸟儿在海浪上空，沿着和海岸平行的方向飞翔，有时候它们还会收起翅膀降落到海面上。有趣的地方就在这里：尽管鹈鹕脚下的波浪永不停歇地涌向海边，它们的身体却会一直停留在原来的位置。

下次去海边欣赏滚滚而来的浪花时，你不妨仔细观察一下海面上的海鸟。[51]快活的鸟儿随着浪潮的波动在海面上起起伏伏，尽管海浪来了又去，海鸟的位置却不会挪动分毫。[52]这个现象告诉我们，形成波浪的海水其实停留在原地没有动过。运动的是波浪，而不是形成波的“物质”——水。波不可能是静态的，它本质上是介质形态的变化，所以波总在运动。波携带能量（水形成波，然后恢复原状，这两种过程都需要消耗能量），但不会携带“物质”。波能够传输能量，有周期性变化。坐在海边凝望海浪会让我觉得心旷神怡，这也是原因之一：我能看到海浪携带着能量不知疲倦地涌向岸边，但水本身却亘古不变。

波有很多种，但无论哪种波都符合一些基本的原理。海豚发出的声波、石子激起的水波和遥远恒星释放的波有很多共通之处。近年来，我们渐渐不再满足于接受自然界的波，转而开始尝试自己制造复杂而精妙的波，将我们的文明中散落的各种元素连缀起来。不过，人类有意识地利用波来巩固文化联系并不是什么新鲜事。早在几百年前，有人就在大洋中做过这种尝试。

国王在大海上冲浪，这一幕听起来像是某个怪梦里的片段。但在250年前的夏威夷，国王、王后、酋长都拥有自己的冲浪板，皇家成员在这项国民运动上的实力彰显着统治者的威严。窄长的欧罗冲浪板（Olo）专属于贵族，平民只能用更短、更易操纵的阿拉亚板（Alaia）。当地人常常举行冲浪大赛，比赛中的戏剧性事件为夏威夷诸多传说故事提供了素材。[53]在一座被蔚蓝深海环绕的热带岛屿上，构建以水上运动为核心的文化听起来顺理成章，而夏威夷的冲浪先驱们还拥有另一个优越条件：得天独厚的海浪。这座小岛坐落在广袤大洋的中央，位置刚刚好。夏威夷岛从地质和物理两个层面过滤掉了大洋的复杂水文环境，形成了可供国王和王后愉快冲浪的完美海域。

夏威夷人望着无风无浪的平静海面，祈祷适合驾驭的中等海浪快快到来；与此同时，数千千米外的另一片大洋景色却截然不同。猛烈的风暴拍打着海面，激荡的能量推动海水上升形成巨浪。风暴中的波浪非常复杂，它们的波长（两道波峰之间的距离）有长有短，运动的方向也各不相同。这些海浪不断破碎、重构，时时刻刻互相推挤撕扯。在纬度约为45°的区域，冬季风暴十分常见，所以在北半球的冬天，风暴常常会在

夏威夷以北的海域肆虐。而在南半球的冬天，夏威夷也是风暴望而却步的边界。

但海浪不会止步，就算风暴已经平息，海面也没那么容易平静下来，起伏的海浪越过风暴边缘，传向远处宁静的海域。在这里，奇妙的事情发生了。看似杂乱无章的浪潮渐渐露出了本质——它们绝非全无规律的一片混沌，而是叠加到一起的各不相同的波。波长较长的海浪传播速度快，把波长较短的兄弟们远远地甩在了后面。但它们在途中也需要付出代价，能量会慢慢散入周围的环境中。海浪的波长越短，每前进1千米需要付出的代价就越大。波长较短的海浪不仅跑不快，还会失去能量，所以很快就会彻底消失。风暴结束几天之后，海浪传到数千千米以外，只有长波残留了下来。它们有规律地轻柔起伏，来到了这颗星球的各个地方。

因此，夏威夷的第一个优势在于，它远离主要的风暴区，大部分海浪传到这里时都只剩下轻柔和缓的长波。第二个优势是，太平洋很深，夏威夷群岛的火山又很陡峭，海浪在广袤的洋面上毫无阻碍地传播，最后一头撞上群岛周围陡峭的斜坡。接下来，原本散布在深水中的能量陡然集中到浅水中，海浪必然会变得更高。在离海滩很近的地方，动作迟缓的怪兽铆足力气，变身成激荡的大浪，义无反顾地扑向完美的沙滩。就在这些海浪拍碎在沙滩上的时候，国王和王后准备好了冲浪板。

水波大概是绝大多数人认识的第一种波。我们都知道鸭子是如何在水波中嬉戏的，容易思考和理解其中的物理学知识。波有无数种，都遵循一些共同的规律。每一道波都有一定的波长，即相邻波峰之间的长度。因为波总在运动，所以它还拥有频率，也就是一秒内循环（从波峰到波谷再到波峰）的次数。除此以外，所有波都拥有速度，某些波（例如水波）的传播速度与波长有关。大多数波都在这个问题上让我们困惑：我们看不到波动的到底是什么？比如，在空气中传播的声音是一种压缩波，在这里，声波传递的不是“形”，而是“力”。最难想象的波其实是最常见的光波，它和电磁场联系密切。我们虽然看不到电和磁，但却能看到无处不在的光波造成的各种效果。[54]

波之所以这么有趣而实用，原因之一是，它常常为传播环境发生改

变。被我们看到、听到、探测到的每一道波都是一座信息的宝藏，藏着它的来处，还有它途经的地方。这些信息可以由几个相对简洁的参数来表示。在波的传播中，最常见的三件事是反射、折射和吸收。

银色鲱鱼和杯中硬币

在超市里路过鱼类柜台的时候，你不妨看看他们都卖哪些鱼。映入你眼帘的很可能是一片闪闪的银光，只有少数几种例外：红鲣鱼和红鲷鱼之类的热带鱼，还有龙利鱼和比目鱼之类的底栖鱼类。不过，鱼类柜台的货品主要是开放海域中成群游荡的那些物种，包括鲱鱼、沙丁鱼和鲭鱼。

银色的有趣之处在于，它实际上不是一种颜色，人们只是用这个词来形容某些物体的反光效果。所有波都能被反射，而且几乎所有材料都会反射一些光。银色的特殊之处在于，它会无差别地反射所有光，不管光的颜色如何。抛光的金属很擅长这样无差别的反射，这种特性相当实用。光的入射角和反射角相等。去看看镜子里的世界，你会发现一切都是真实世界的等比例左右颠倒。这正是因为一切投到镜子上的光全都以同样的角度反射了出去。

金属抛光很难达到这样的效果，所以镜子在人类历史上曾是昂贵的奢侈品。而鱼天生就是银色的，这是为什么呢？鱼甚至无法利用金属。要呈现出银色，它们必须用生物分子构建出全反射表面。这项工作相当复杂，所以在演化中也必然是个昂贵的选项。如果你是一条鲱鱼，你为什么要费这个劲呢？

鲱鱼在海里成群结队地游荡，捕食虾之类的小型生物，同时躲避各种各样的大型食肉动物，比如海豚、金枪鱼、鳕鱼、鲸和海狮。但海洋如此辽阔而空旷，有时候你根本无处躲藏。唯一的办法是“隐身”，或者借助自然条件尽可能地伪装自己。既然如此，鱼能不能变成大海的蓝色？问题是，不同时间的光线和水里的物质都会影响海水的颜色，海水的蓝色实际上总在变。而为了保命，鲱鱼必须时时刻刻融入周围的背景。所以它们把自己变成了游动的镜子，因为无论是在鱼群的前方还是后方，大海总是一样空旷。这些鱼能反射90%的光，就像高品质的铝镜

一样。反射的光波会传到潜在掠食者的眼睛里，这就是鲱鱼的光盾。

不过很多时候，光并不会发生完美的全反射。更常见的情况是，某件物体只会反射一部分光。要是你想分辨两件并排放置的物品，这一点就很有用了。那个反射蓝光的是我的茶杯，而反射红光的是我妹妹的杯子。反射什么光由反射面决定。不过，波在遇到分界线时不仅仅会发生反射，折射会以一种更微妙的方式改变光的传播路径。

夏威夷女王伫立在悬崖上俯视海滨、欣赏海浪的时候，她也许会发现，尽管翻涌的海浪来自四面八方，可是当它们到达海滩的时候，几乎所有海浪都变得平行于海岸了。无论海滩朝向何方，绝不会有侧着撞上来的海浪。这是因为水波的速度取决于水的深度，较深处的波传播速度更快。想象一片长而直的海滩遇上了一道微微向左倾斜的波浪。右侧的波峰离岸较远，处在更深的大海中，所以传播的速度更快。很快右侧海浪就会追上左边的伙伴，整道海浪在传向岸边的过程中顺时针转动了一点。等到海浪在沙滩上拍碎的时候，它已经完全平行于海岸了。通过改变部分区域的波峰相对于其余部分的运动速度，我们可以调整波的传播方向，这就是折射。

改变水波的速度还比较容易想象，那光波呢？物理学家们总爱念叨“光速”，光的传播速度快得不可思议，这个参数在爱因斯坦最著名的遗产——狭义相对论和广义相对论——中占据着举足轻重的地位。科学界花费了很大力气才让人们逐渐接受了“光速恒定”这个精妙的概念。要是我现在告诉你，实际上你这辈子从没有见过真正以“光速”传播的光，那我就成了派对上的扫兴鬼。就连水也会拖慢光速，你可以自己用硬币和杯子来证明。

将硬币平放在杯底靠近你自己的那一侧，然后慢慢移动身子，直到在你的视线中硬币被杯子边缘遮住。现在你看不到硬币，因为光沿直线传播。在这个角度，硬币反射的光线被杯壁遮挡，无法进入你的眼睛。接下来，不要移动你的头，也不要移动杯子，请你的搭档往杯子里注水。你会发现，随着水位的上升，硬币慢慢重新出现在你眼前。硬币没有移动，但它反射的光在水中改变了方向，进入了你的眼睛。

这个实验直观地展示了在水中减缓的光速。等到光重新进入空气，

它的速度又会加快，光波在穿越水和空气的分界面时会偏折一个角度，这种现象我们称之为“折射”。能够折射光线的不仅仅是水，任何介质都会不同程度地拖慢光速。我们平时说的“光速”实际上指的是光在真空中传播的速度，水会让光速下降到真空光速的75%，对于玻璃而言，这个数字是66%，而光在钻石中的传播速度只有最高速度的41%。光速下降得越多，它在该介质与空气的分界面上偏折的角度就越大。钻石比其他大多数宝石闪亮得多，因为它们的折射率远高于其他石头。正是因为有了光的折射，你才能真正地看到玻璃、水和钻石。这些材料本身是透明的，所以你无法直接看到它们。你看到的是它们反射的光和背景的差异，只是大脑把它阐释成“你看到了这件透明的物品”。

能看到钻石当然不错，对于那些花大钱买钻石的人来说，这一点尤其重要。不过，折射带来的不仅仅是美。了解折射之后，人类磨制了透镜，而透镜打开了科学界另一片广阔天地，人们有了研究微生物和细胞的显微镜、探索宇宙的望远镜，还有能将细节永久保存下来的摄影机。如果光波始终以真空光速传播，那么这些东西都将不复存在。

我们生活的世界里充盈着光波，这些波不断发生反射和折射，在传播过程中减速、加速。就像风暴中陷入混沌的海面一样，不同的光波彼此交叠，在我们周围向四面八方传播。但是我们的眼睛会进行挑选，屏蔽一部分，留下一部分，再由大脑进行解释和演绎，最后形成视觉。站在悬崖上的夏威夷女王利用光波眺望水波，这两种波背后的物理学原理完全相同。

大海的颜色、雷电和烤面包机

只要光进入你的眼睛让你看到了东西，那么它是折射而来还是反射而来的就根本无关紧要。但是，要是这些光根本没有进入你的眼睛呢？

生活中有这么一件古怪的小事：要是你给孩子几支蜡笔，让他们画一幅水从龙头里涌出来的画，那么他们画出来的水总是蓝色的。但实际上，谁也没见过水龙头里流出蓝色的水。自来水是无色透明的。要是你家的自来水有颜色，那你最好请水管工来看看。如果你真的看到水龙头里流出了蓝色的水，那你肯定不会喝它。但孩子们画出来的水却总是蓝

的。

在卫星拍摄的地球照片上，海洋总是一片湛蓝。这并不是因为海水含盐，冰川顶上融化的冰水也会形成湖泊，这些湖里完全没有盐，但它们看起来依然是深邃的蓝色，简直像是有人在冰里加了蓝色的食用色素。但是，等到这些水顺着冰川流下来，和其他融化的冰水混合起来形成细流的时候，它又变成无色的了。决定颜色的不是水的成分，而是水的多少。

射向水面的光波要么被反射回天空中，要么穿透水面传向深处。可是有时候，水里的某些物质，甚至水本身都会阻碍光的传播，让光波发生折射。如果同一束光波被折射的次数够多，那么它可能会绕一个大圈子，最终回到空气里。在这漫长的旅程中，水会过滤光。来自太阳的光有多种不同的波长，它包含着彩虹的所有颜色。但水会吸收光，而且对不同颜色的光吸收率各不相同。最先消失的是红光。大部分红光只能传到水下几米，往下走几十米，黄光和绿光也会相继消失，但蓝光很难被水吸收，它能在水中传播很长距离。因此，光在海洋中传播时，最后留下来的大部分是蓝光。自来水之所以是透明的，是因为水量不够多，不足以让我们看到吸收率的差别。其实自来水的确呈现了某种颜色，这一点和世界上所有的水相同。但这种颜色很淡很淡。你需要大量的水，才能看出光波从中穿过造成的区别。[55]当你真正看到的时候，那景象的确十分壮丽，你会发现，鲜艳的蓝色蜡笔的确是最正确的选择。但你永远无法从水龙头里发现这个秘密。

波在传播过程中可能会被介质吸收。这个损耗的过程非常缓慢，能量一点一滴地流失，损失的大小取决于波的类型和波长。如此巨大的变数意味着波能做很多事情，也能告诉我们很多东西。雷暴是我最喜欢的大气现象，从雷暴中我们不难观察到这类反差。

震撼天地的雷暴提醒着我们，空气绝不仅仅是天空中看不见的填充物。我们的大气中充满了巨量的水和能量。通常情况下，这些颇有分量的东西只会缓慢而平和地转移。但是，如果舒缓平和的调节已经无法让大气恢复平衡，天空中就会出现黑压压的积雨云。地面附近轻盈的湿暖空气向上推挤冷空气，为后者注入海量能量，戏剧性的变化就此开始。

灼热潮湿的空气在云海中快速上升，搅动高处的大气，形成雨滴。最戏剧性的地方在于，这样的搅动会导致带电粒子分离，然后这些粒子又被分配到云层的不同区域。带电粒子不断聚集，直至强大的电流撕裂附近的云层，甚至直接劈向大地，让地面带走多余的电荷。每道闪电的持续时间不足百万分之一秒，但雷声却会经久不息地在天地间回荡。我喜欢电闪雷鸣，不光是因为它们壮丽，也是因为它们揭开了大气运动的秘密。雷暴看起来似乎十分矛盾：闪电耀眼而短暂，雷鸣却低沉而悠长，不过无论是闪电还是雷鸣都展现了波的多姿多彩。

闪电一闪即逝，在大气中产生一条过热通道，从雷暴云通向地面，或者通往另一朵云。通道中充满了能量，在蓝白色闪电划过的刹那，温度可达50000℃。耀眼的光亮飞速向外扩张，占领整个地平线，但由于传播速度极快，所以这光在下一个瞬间就会消失。但闪电产生的高温会让周围的空气迅速膨胀。如此产生了一种强大的波，紧跟着光波在空气中如涟漪般荡开，但它的传播速度就慢得多了。这些涟漪形成的声波就是我们听到的雷鸣。我们之所以知道闪电的存在，是因为它制造出了光波和声波。

波传递的是能量，它不一定需要空气、水或者其他任何介质，这一点非常重要。这意味着波能够轻松地在这个世界上传播，对其他事物产生影响，带来有趣或有用的结果，却不一定会推挤我们周围的物品，造成严重损伤。闪电会释放大量的能量，光波和声波会将其中一部分能量分享出去，传递到其他地方。在声波的传递过程中，就连空气也不会离开原地太远，只有能量一路飞驰向前。光和声音是不同类型的波，但它们遵循同样的物理学原理。光和声音都可能被传播介质改变。打雷的时候，你可以直接听到声波的变化。

我最喜欢待在离闪电大约1600米的地方。看到闪电划过，我就会开始想象压力产生的巨大涟漪正在向我涌来。望着远方，我仿佛真的可以看到这阵阵涟漪，但第一声雷鸣还要再过几秒钟才会传到我耳边。这些声波传播的速度大约是340米/秒，这意味着它们需要4.7秒才能跑过1600米的距离。第一声炸雷听起来和撕裂天地的闪电十分相称。但雷鸣真正特别的地方在于，我不会只听到一声炸雷，接着第二声在更高一点的地方炸响。两道声波原本完全一样，但高处的声音之所以会慢一点，

是因为它需要经过更长的路径才能传播到我的耳朵里。低沉的雷鸣连绵不绝，这实际上是同一道闪电从不同高度发来的声波。

如果说1600米外的第一声炸雷需要5秒钟才能传到我身边，那么比它高1600米的声波很可能要多花一两秒。不同的炸雷在诞生之初几乎完全相同，只是位置不同。这意味着我能听见大气介质如何改变这些声波。越晚到达的雷声来自越远的地方。第一声炸雷音调最高，消失得也最快，因为高频波很容易被大气吸收，但低频波却会回荡很长时间。随着时间的流逝，这些波传得越来越远，整体声调也变得越来越低沉，因为最高的声调已经被空气吸收了，而最低的声调却会一直保留下来。如果你离闪电足够远，那么所有声波都会被空气吸收，你不会听到任何声音。但闪电传播的距离要远得多，因为光波的性质不同，它们的传播不需要借助空气。不过，光虽然不太容易被空气吸收，但会被其他因素影响。

从某种意义上说，波非常简单。它们诞生后总会传向某个地方，而且无论是声波、光波还是海浪，所有波都能被介质反射、折射或吸收。波的洪流错综复杂，我们生活于其中，通过波来感知周围的世界。我们的眼睛和耳朵适应了中间地带的波段，而这些波携带着两种非常重要的“乘客”：能量和信息。



阴郁寒冷的冬天，面包片是最完美的食物。唯一的问题在于，这样的喜悦需要花费一点时间去获取。通常我会先烧水准备泡茶，接下来把面包放进烤面包机，然后开始在厨房里不耐烦地来回踱步，等待一切就绪。洗完一两个杯子并且清理干净操作台以后，我总会发现自己目不转睛地盯着烤面包机，检查它的工作情况。

烤面包机的美妙之处在于，你可以直观地看到它在干什么，因为它的加热组件会发出红光。这些组件不光会加热周围的空气，还会辐射光。这些光相当于内置的温度指示彩灯，你可以通过光的颜色来判断加热组件的温度。明亮的红光意味着烤面包机内部达到了1000℃，这个温度真的很高——足以熔化铝或银。这里隐藏着宇宙运转的规律。特定温度范围内的物质会发出同样的光，光的颜色不同，温度就不同。如果你

在炭火中发现了鲜艳的黄色，那么它的温度大约是2700℃，而温度达到4000℃以上，物体就会呈现白炽的颜色。仔细想想，你会好奇颜色和温度有什么关系。

盯着烤面包机的时候，我看到了能量从热转化为光。宇宙中有一条简洁优雅的法则：任何温度高于绝对零度的物体总在不断地将自身的部分能量转化为光波。光必然会传播出去，所以能量也会随之流失。烧红的加热组件将自己的部分能量转化成红色的光波，在彩虹光谱上，它位于波长最长的那一端。事实上，加热组件释放更多的是红外线。红外线和可见光也谈不上天差地别，它的波长更长而已。我们只能以间接的方式得知红外线的存在，比如感受到红外线的加热效果。虽然我们看不见红外线，但它对烤面包机来说非常重要——面包加热靠的主要就是红外线。

高温物体放出的光有一定的波长范围。温度不同，发光波长范围不同，发出的所有光里最亮的那一种光也会不同。每一个具体温度都会在某一段波长上发出最亮的光。其他的光，波长和最亮的光越接近就越明亮。如果以波长为横轴，以光亮程度为纵轴，那么在温度确定的情况下，绘制出的图就像一座山峰。不用说，最亮的光就是山顶，其他的光则在山坡上。

对于烤面包机而言，山顶在红外区，红光在近旁的山坡上。我们看不见红外线，但是可以看到红光。

如果我拥有一台能达到更高温度（比如2500℃）的超级烤面包机，那么它的加热组件看起来应该是黄色的。因为物体的温度越高，就会释放越多的短波长光，包含更多颜色（红色、橙色、黄色，还有一点绿色）。而这些光混合在一起，看起来就是黄色的。在这里，温度和光的颜色之间有着明确的对应关系。要是温度进一步上升——假设某种终极烤面包机能达到4000℃——那么它释放的光就应该包含彩虹的所有颜色，从红色一直到蓝色都有。这些颜色混合起来，我们就看到了白色。因此，发出白炽光的高温物体实际上释放了彩虹的颜色，只不过几种颜色都混在了一起。这台终极烤面包机的缺陷在于，几乎所有材料都无法承受这样的高温，它一定能在最短的时间里把面包片烤得焦黄，却也会

同时毁掉厨房。

可以说，烤面包机也是一种光波制造机。你看到的红光就是它通过温度制造出来的一部分波，而你看不见的红外线加热了面包片。你会发现，面包片只有表面一层变成了棕黄色，因为接触并吸收红外线并因此升温的只有这一层。我在等待的时候喜欢盯着烤面包机看，因为我总会想到它释放的那些看不见的波。我知道它们在那里，因为红光泄露了它们的行迹。

不过，这种制造波的方式也有缺陷。通过这种方式得到的光波其实是多种波长的混合光，你不可能只要其中的一部分，而不要其他的。无论是煤炭、熔化的钢铁还是别的什么东西，在1500℃左右必然会发出某种橙色光。你可以通过颜色来猜测物体的温度，只要它热得足以让你看到颜色。太阳的表面温度大约是5500℃，所以阳光是白色的。事实上，正是这个原因，我们才能看见夜空中的恒星。恒星的温度很高，它们发出的光能跨越宇宙传到我们的眼睛里，我们可以通过恒星的颜色来推测它的表面温度。

我们人类也有颜色，因为我们都拥有体温。这种颜色我们看不见，但能被特殊波段的红外摄影机拍到。我们的温度比烤面包机低得多，但我们也会发光。我们释放的光波波长通常是可见光的10～20倍。每个人都是一盏红外线灯泡，这些光就来自我们的体温。猫、狗、袋鼠、河马——所有动物也都会发光。任何高于绝对零度（-273℃，这个温度低得可怕）的物体都是一个灯泡，只不过物体的温度越低，释放的光波长就越长，甚至比红外线还长，进入了微波的范围。[56]

我们时刻沐浴在各种各样的波之中，有看得见的，也有看不见的。太阳、我们自己的身体、我们周围的世界以及我们创造的技术都在不断地释放光波。声波也同样多姿多彩，有高音，有低音，有蝙蝠用来捕猎的超声波，还有帮助大象侦测天气的次声波。最棒的是，所有这些波可以在同一个房间里传播，不会彼此干扰。无论屋子里是漆黑一片还是闪烁着迪斯科舞池的迷幻灯光，声波都不会受到任何影响，而钢琴演奏会和哭闹不休的婴儿也不会影响光波。我们睁开眼睛，竖起耳朵，就能接收到所有波，只不过我们会从波的洪流中提取、挑选最有用的一小部

分。

可是，该挑选哪些波呢？最新款的自动驾驶汽车和森林里挣扎求生的动物肯定会给出不同的答案。周围环境中的信息几乎无穷多，你可以只挑选那些对你帮助最大的波。蓝鲸和海豚基本上听不见彼此的声音，就算看到穿着潜水服的你，它们也不会大惊小怪。

海豚和“泰坦尼克号”

加利福尼亚湾沿着墨西哥西海岸延伸，这是一处至少横跨1000千米的海洋天堂，南端直通太平洋。两岸漆黑嶙峋的山峰直指天空，守卫着蓝色的海峡。海洋物种跨越大洋长途迁徙，来到这里觅食、休憩。渔民乘着小船在海峡中漂流，享受着这份宁静。这片海域之所以如此太平，是因为这里的海浪非常平缓，波澜较少。白天的阳光照耀着蓝色的大海和光滑的礁石，天地间你只能听到层层叠叠的涛声和浪花拍打小船的水声。灵巧纤细的海豚跃出水面，短暂地打破平静，然后哗啦一声回到藏着热闹景象的大海中。海底深处，嘈杂的生态系统正在有条不紊地运行。

海豚下潜时会发出高频的哨声，以此与身后的伙伴交流。等到海豚群重新聚集起来，这片海域立即就会响起一阵阵清脆的滴答声。海豚可以用前额发出这种尖锐短促的声波，它碰到周围的物体就会回弹。回声通过颌骨传进海豚的耳朵，这样一来，海豚就能根据声波判断周围的环境了。哨声、滴答声和啁啾声组成一片喧嚣，就像繁忙街道上的声音。

海豚就这样在移动中借用声波进行交流。在海面上换气、嬉戏之后，海豚群会潜回深海狩猎。海面上无处不在的光波在深海里变得极其罕见。因为水吸收光的速度极快，所以深海居民难以通过光来获取信息。海豚的眼睛在水面上下都能工作，但对于从光波中提取哪些信息，它们在演化中做出了选择。海豚完全不会分辨颜色——要是在你生活的环境里，所有颜色看起来都差不多，那为什么还要费劲去分辨呢？海豚的世界是蓝色的，但它们自己却永远不会知道。海豚看不见蓝色，在它们眼里，海洋世界漆黑一片。但它们能看到银色的鱼从身边经过时闪光的鳞片，这就已经足够。

海面就像《爱丽丝漫游仙境》里的镜子，它隔开了两个世界，但二者可以互通。声波在海面上很容易反弹，所以空气中的声音很难传到海里，而海里的声音也很难传到空气中。光和声音都能在空气中轻松地传播。而在海里，光很快就会被吸收，声波却能迅速高效地传播。要是你想研究海洋环境，那就得好好利用声波。光波在海里没有太大用处，除非你要观察的东西离你很近，而且就在海面下一点点。

海底世界的声音非常丰富。海豚发出的声音频率极高，部分声音的频率甚至是我们听觉极限的10倍。这意味着它们的回声系统能够探测前方物品的形状细节。但高频声波传播的距离比较短，所以海豚群吵吵嚷嚷的声音根本传不到海峡对面。有些声音传播的距离比海豚的叫声远得多，比如遥远船只低沉的汽笛声，海面飞溅的浪花激起气泡的声音，鼓虾发出的酷似爆米花的噼啪声，还有海豚根本无法听见的低沉哼鸣。这哼鸣声周而复始，因为十几千米外，一头蓝鲸正在呼喊，它的叫声在海中回荡。鲸没有回声系统，它不需要高频音，它需要让声音传播得尽可能远，这意味着它的音调必须保持低沉，即波长更长。长声波能够跨越漫长的距离，鲸需要的正是这样的通信工具。这些鲸听不见海豚发出的叫声，海豚也听不到鲸歌。但这些波都由海水承载，不同生物可以从这信息的洪流中提取自己需要的片段。

海里也藏着光波和声波的洪流，不过这里的情况与空气中截然不同。声音是海底世界的王者，鲸和海豚都是色盲，光波的细节对它们来说不重要。

不过，大气和海洋也有相似之处。长声波在水下传得远，长光波在空气中也传得远。在一百多年前，人类刚刚学会如何跨越数千千米传递信息。因为我们生活在空气中，所以不能用声波来完成这项任务，我们的远距离通信靠的是光。这么长的光波被称为“无线电波”，起初，无线电技术最重要的用途是跨洋通信。如果当年某些船只更加重视无线电信号，“泰坦尼克号”或许根本不会沉没。

1912年4月15日，午夜刚过，来自北大西洋数个站点的无线电波开始如涟漪般向外循环扩散。这些信号有些零散，涟漪越向外扩散，信号就越弱。某些站点收到了这些信号，于是继续向下传递。最强的信号来

自加拿大纽芬兰以南650千米处的一座站点，杰克·菲利普斯（Jack Phillips）利用功率最大的船用无线电发射器发出了求救广播——全世界最大的邮轮“泰坦尼克号”正在沉没。杰克在巨轮顶层的甲板上，用架设在烟囱之间的天线发送脉冲信号，天线将信号向外传播，其他船只的无线电操作员可以解码这些电波，破译出其中携带的信息。

无线电波之所以能用于通信，是因为这种波不是只在某一条线上传播，而是如涟漪般向外扩散。你不需要知道信号接收者的具体位置，同一道波可以被多个不同的站点获得。“卡帕西亚号”（Carpathia）、“波罗的海号”（Baltic）、“奥林匹克号”（Olympic）和几百千米内的其他船只都能探测到“泰坦尼克号”发出的脉冲。这些脉冲携带的信息或许容量有限、含义模糊，但这是人类历史最早的跨洋通信应用。

无线电技术的诞生彻底改变了航运业。要是在20年前，“泰坦尼克号”只能孤独地沉入海底，它失事的消息可能要等到一两周后才会传开。在此之前10年，人类才第一次完成了跨越大西洋的无线电信号传输。不过在那个夜晚，黑暗中一圈圈扩散的波让附近的所有船只在第一时间得知了这艘巨轮的悲剧。这些断断续续的脉冲并不是随机的。扩散的涟漪有独特的模式，每种模式都携带着发送者写入的信息，光速跨越大洋。它象征着人类通信史上一场宏大的革命，翻涌的信号揭开了无线电时代的大幕。

“泰坦尼克号”失事之所以这么出名，原因之一是它正好发生在这个新时代的风口浪尖。这次事故展现了无线电的巨大潜力。“泰坦尼克号”沉没两个小时后，“卡帕西亚号”及时抵达现场，挽救了很多生命。但我们看到，当时的无线电系统还非常简陋，实用程度有限。信息的传递十分低效，而且“泰坦尼克号”此前本该收到冰山预警信号的，可是珍贵的信号被琐碎的常规信号干扰了。更重要的是，以最直接的方式发送无线电波时，信号很容易混淆。发送者和接收者没有明确的标识，信息可能无法正确传递，甚至根本无处送达。要利用这些波来传递信息，你需要进行某种标准化的加工，好让所有接收者清楚地理解这些波的意义。然而，那时的船用无线电系统实际上只是一种开关，开开关关组成信号，实在谈不上多么标准、多么明确。雪上加霜的是，所有电台用的都是一个频道。

那天晚上，大洋上方不是只有无线电波。“泰坦尼克号”还发射了求救信号弹，附近的“加州人号”（Californian）也曾试图用发射可见光的莫氏信号灯与它通信。但是，可见光不会比无线电波传得远，这是大气决定的。上层大气（电离层）会像镜子一样反射一部分无线电波。来自“泰坦尼克号”的无线电信号不是简单地扩散了出去，一部分进入电离层的无线电波会回到下面。要知道，地球表面是弯曲的，信号的发送者和接收者甚至很可能不在一条水平线上，大气层帮助无线电波解决了这个问题，让它可以折折返返地跨越海洋。可见光就没有这样的优待了。

杰克·菲利普斯继续向空中发射无线电脉冲，向所有倾听者广播这艘巨轮的位置，直到无线电发报室被海水淹没。他没能逃过这场劫难，但长距离通信救活了船上的另外706位乘员（乘员总数是2223人）。这些幸存者见证了这个世界从完全没有无线电到看不见的通信电波无处不在的历史进程。现在，地球上几乎已经不存在没有无线电波的角落，人类文明之间的联系从未像今天这样紧密。

灯光密码

光波支持着我们的世界，它承载的残余太阳能虽然微不足道，却驱动着我们的星球。光是我们和宇宙之间的联络员。在20世纪，我们的文明开始试着与电磁波谱上的所有波建立新的关系。我们曾是被动的接受者，只能心怀感激地接收光波无意间带来的能量和信息，但是现在我们开始有意识地制造、使用光。对光的熟练应用开启了新世界的大门，我们由此掌握了观察世界的多种技术。现在我们几乎可以把信息实时传递给每一个活着的人，就在此时此刻，只要有一部手机，你就可以跟世界上的任何一个人通话。

不过，要从波的洪流中得到有用的信息，首先你得想个办法把它分离提取出来。幸运的是，波自身提供了答案，你不需要专业的工具包也能完成这个任务。

田纳西州的大雾山景色壮观，深绿色的森林覆盖着起伏的山谷和山峰。那里的森林人迹罕至，格外安宁。要进入大雾山的林地，我们必须驾车经过桃莉·巴顿（Dolly　Parton）的故乡。我当然听说过这位伟大的

乡村歌手，但桃莉坞公园的热闹景象依然让我措手不及。这座庞大的公园以田纳西、乡村音乐和游乐场为主题，不过，最闪亮的主角当然还是桃莉。以公园为中心，粉红色的牛仔帽、装饰华丽的吉他、随处传唱的乡村音乐、茂密的金发、复古牛仔外套和南方式的热情好客已经渗透了周围的城镇。在这样的环境中，晚餐后来杯波旁威士忌就是最重要的事，尽管我私心里更喜欢牛仔帽。第二天，我们又在大烟山里见到了另一番景象。

人们带着折叠躺椅和便携式冰箱进入山间，静静地欣赏林间美景。在那醇美的黑暗中，任何一点光线都会破坏氛围，所以山里禁止使用电筒和手机。随着黄昏的降临，萤火虫之舞拉开了帷幕，上百万只萤火虫在山林间闪烁着点点柔光。当时我们的任务是拍摄一部科学纪录片，而且我们只有一个晚上的时间用来拍摄这里的场景。这里有个问题：你必须在黑暗中移动，还得知道自己是在往哪儿走。有人建议我们用红光灯照明，因为红色的光线对萤火虫的干扰显然比白光小。于是我们打开暗淡的红灯，蹑手蹑脚地在森林中行进。大约凌晨1点时，萤火虫的表演基本结束了，我们准备拍摄最后的几个片段。导演和摄影师正在设置灯光，我头顶红灯藏在一片黑暗的空地中，一边用遮光布裹住自己御寒，一边匆匆做笔记。大家都准备好了以后，我起身走向他们，同时打开笔记本，试图写下最后的几句话。但是借着导演的白色头灯，我发现自己写的笔记根本看不清楚。红笔和蓝笔的字迹交相覆盖，完全无从分辨。

其实这是一个绝佳的示例，可以让你看到不同波长的波为何不同。我意识到，红色字迹一定是我在白天写下来的。在白光下，你很容易看到白纸上的红字，但在红色头灯的照耀下，红色的墨水会消失不见。这是因为这时白纸只能将红光反射到我的眼睛里，而红墨水反射的同样是红光，于是笔记本看起来就是一片空白。因此，我不得不在同一张纸上用蓝笔又写了一遍。蓝色不会反射红光，所以我在一片红色中可以看见蓝色字。要是把头灯换成蓝色，那么我就只能看见红字，蓝字反而隐藏了起来。在不同颜色的光线下，我可以看到不同颜色的字迹，因为我对波长做出了选择。红光的波长比蓝光长，知道了这个，我就能提取不同的信息了。

事实上，我们调台接收节目的过程也是这样的。我们对一个特定的

波进行探测时，会集中寻找某一小段波长。如果此时出现了另一种波长的波，我们根本不会意识到它的存在。我的笔记本清晰地证明了可见光完全符合这个原理，而那些看不见的波也是如此。我们周围的世界充满了各种各样的波，它们彼此重叠，就像笔记本里不同颜色的字迹一样。这些波互不干扰，也不会改变对方的颜色，每一种波都是完全独立的。你可以选择去接收长波长的无线电波，收听无线电台，也可以按下遥控器，发出只有电视机才能识别的红外信号。你可以用红笔在纸上写字，也可以盯着手机看一看有没有无线网络信号。关于最后一个例子，你可以这样理解：我们所熟知的网络都有自己的“颜色”，只不过这些“颜色”都处于微波的波长范围内，我们看不到而已。

各种波长的波层层叠叠，互不干扰，一直存在于我们身边。采用正确的方式，你就能看到想看到的东西。我们的双眼用来认识世界的波段十分狭窄，局限在可见的彩虹色范围内，但其他看不见的波段完全不会影响这些可见光。

不同波长的波不会互相影响，这一点非常重要。我们可以挑选出感兴趣的波长，完全忽略其他波长。特定的环境会以独特的方式影响每一种波长的波，对它们进行挑选、过滤。虽然我在阴雨连绵的曼彻斯特长大，很少看到晴朗的夜空，但英国最大的望远镜离我的家乡只有22千米。焦德雷班克的洛弗尔巨型射电望远镜（Lovell Telescope）直径达76米，哪怕在曼彻斯特最阴沉的日子里，厚达数千米的雨云堆积如山，这台望远镜依然能够不受影响地观测天空。

对于波长不到百万分之一米的可见光来说，进入云层就等于闯入了一台巨型反弹机。光会不断发生反射和折射，最终彻底被云层吸收。但波长在5厘米左右的大量无线电波却能畅通无阻地穿过这些微不足道的障碍，完全不受影响。如果你有机会在雨天拜访曼彻斯特，请记住这件事。尽管你连树顶都看不见，但是想到天文学家仍能通过无线电波看到壮美的宇宙，你也许会得到一点安慰，也有可能从心底升起一点嫉妒。[57]

温室效应和地球

在地球周围，不同波长的光会有不同的旅程，这是这里适合居住的重要原因。灼热的太阳会送来十分丰富的波，其中只有一小部分会留在我们的岩石行星上。这些光线携带的能量就是地球的热量来源。然而，考虑到和太阳的距离，地球的地表温度应该只有冰冷刺骨的-18℃，而不是现在温暖舒适的14℃。我们之所以能够免遭冻死的厄运，完全是因为地球就像一个温室。这是因为不同波长的光以不同的方式与地球大气互动。

想象一下你正站在半山腰上，眼前的景象像动画片一样可爱：天空澄蓝，间或有一两朵蓬松的白云点缀其间，让美景更加生动。遥望远处的平原，你能看到绿树、青草和深色的土地。阳光灿烂，云朵在大地上投下一块块流动的影子。在这里，洒在你身上的阳光已经和它刚刚离开太阳的时候大不相同。大气吸收了很多波长很长的红外线，以及波长很短的紫外线，但可见光几乎完全不受影响。传到地面的光线经过了大气的选择和过滤，这才是我们看到的光。在可见光的波段范围内，天空就像大气层的窗户，它会无差别地接纳所有波。无线电波另有一扇专门的窗户，所以射电望远镜才能观察宇宙，但其他大部分波都会遭到阻隔。

你看到的大地颜色越深，它吸收的可见光就越多。被吸收的能量最终都会转化为热。如果在晴天触摸黑色的地面，你会感觉地上发烫。没有吸收的光会反射回空中，通过大气，再次进入宇宙。如果有外星人正好从附近经过，这些光就会进入他们眼中，让他们看到地球的模样。

大地变暖了。就像烤面包机的加热组件一样，温热的地面也会释放出光波。当然，大地的温度没有烤面包机那么高，所以我们看不到它发光。但在更长的红外波段上，温暖的地面就像灯泡一样明亮。接下来我们就该讲到温室效应了。大气中的大部分成分都不会阻拦红外线，但某些比例不高的成分（水、二氧化碳、甲烷和臭氧）对红外线的吸收作用极强，它们就是“温室气体”。你可以看到被地面反射回来的可见光，却看不到地表释放的红外线。如果能看见红外线，你会发现它们在离开地面以后变得越来越弱，最终彻底消失。红外线在向上传播的过程中被大气吸收了。吸收红外线的气体很快又会交出自己刚刚得到的能量，再次放出红外线。重点来了：这次释放的红外线不是向上传播的，而是无差别地传向四面八方，其中一部分会向下传播，然后再次被地面吸收。地

球因此变得更加温暖，不会遍地冰凌。整套系统必须达到新的平衡，最终我们得到和失去的能量必须完全相等，否则地球就会变得越来越热。所以，地球会持续受热，直至释放的红外线与吸收的能量达到平衡。

这就是温室效应，[58]它其实是一种自然现象。一般而言，地表平均温度在14℃时，整套系统处于平衡状态。不过，随着化石燃料的使用，大气中的二氧化碳越来越多，原本应该离开地球的一部分红外线被锁在了大气层内，平衡被打破了。地球要变热才能达到新的平衡。其实大气中二氧化碳的含量并未发生太大变化：1960年，二氧化碳在大气层中的占比是0.0313%；2013年，这个数变成了0.4%。这样的变化堪称微乎其微，其效果却不可小觑。而甲烷吸收红外线的能力甚至比二氧化碳更强。温室效应将地球变得温暖宜居，也会让气温发生剧变。我们看不见参与温室效应的光波，但能估测它造成的后果。

珍珠和手机通信

各种各样的波在我们的世界里荡漾——有波长极长的无线电波，也有较短的可见光波，还有海浪、鲸歌的低沉声波和蝙蝠的超声波。这些波彼此重叠交叉，却互不影响。但这里有一种特殊情况：两道完全相同的波相遇时会发生特别的事。如果你正握着一颗彩虹色的珍珠，那么你会看到一个美丽的答案，但要是你想维持手机正常通话，就得尽量避免这样的情况。

你可以在大溪地和南太平洋其他岛屿周围的蓝绿色海水中找到大珠母贝（Pinctada　maxima），它们生活在海床上，在几米深的海水中就能看到。进食的时候，大珠母贝会微微张开壳，每天它都会吸入一些海水。壳内的软体动物悄无声息地滤出有价值的食物微粒，再把过滤后的水重新排入大海。

哪怕从正上方游过，你也很难注意到大珠母贝。它们褐色的壳粗糙黯淡，毫不起眼。它们就像大海里默默工作的吸尘器，从没想过出风头，但埃及艳后、法国末代王后、玛丽莲·梦露、伊丽莎白·泰勒却都爱上了这些贝类阴错阳差制造出来的东西：美丽的珍珠。

在极偶然的情况下，某个刺激物会钻进贝壳里面。大珠母贝无法排出侵入的异物，所以它只好用一种无害的物质——构成贝壳内部涂层的那种物质——把异物包裹起来。软体动物通过这种方式来完成清扫，将侵入者化为自身的一部分。大珠母贝分泌的覆盖物由无数微小的薄片组成，生物胶将它们层层黏合、堆叠在一起。这个过程一旦开始就会自然而然地进行下去。最近人们发现，珍珠在成形的过程中可能每隔5小时就会翻转1次。潮水涨落，季节变迁，鲨鱼、蝠鲼和海龟在头顶来往穿梭，海床上的大珠母贝静静地过滤海水，在黑暗中孕育着体内旋转的珍珠。

直到多年以后，可怜的贝壳终于惨遭不幸——它被人类捞起来打开了。珍珠第一次接触到了阳光，光线在闪亮洁白的表面纷纷折返。事实上，珍珠的表面不足以反射所有阳光，部分光会穿透表层，在更深处发生反射，或者在珍珠内部折射数次，最后再回到空气中。

现在，我们来关注一下纯净的波（比如阳光里的绿色光波）以及和它相遇的同类波。不同波长的波不会相互影响，但相同波长的波可以发生叠加。以珍珠为例，表层和更深层都会反射绿光，那么一旦这几道反射光叠加在一起，得到加强，就会生成一道更亮的绿光。不过，以同样角度入射的红光却不会得到同样的叠加，反倒可能相互抵消，因为红光和绿光波长不同，红光的加强需要另选角度。

珍珠为什么这么美，让人类历史上的那些美人爱不释手？因为大珠母贝的分泌物形成了这样一种特别的结构，可以让光波大放异彩。同样颜色的多道光线可以在这里发生一点点错位，好让光波叠加（物理学家会说它们发生了干涉）。在某个角度，我们可能会看到珍珠洁白光滑的表面上闪烁着绿色的光，换个角度，我们也许会看到蓝色的光。在阳光下转动珍珠，不同颜色的光便闪烁起了动人的七彩色泽。人类珍视这样的光泽，因为它既稀有又美丽。

从物理层面上说，珍珠只是对不同的光波做了相同的处理，而你在旋转珍珠的时候可以看到不同光波的处理结果。而在我们看来，珍珠似乎可以自己发光，这让我们爱不释手。不久前人类已经开始尝试人工制造珍珠，不过直到今天，大部分珍珠依然是通过珠母贝培育出来的。

珍珠让我们看到了同一种波叠加的结果。有时候两道波的波峰和波谷会重叠起来，形成一道更强的波，朝某个特定的方向传播；有时候它们又会互相抵消，彻底消失。如果波的来源不止一个（请想象一下两粒石子在池塘里激起的涟漪叠加在一起），或是波发生了反射，都会形成新的模式。

不过，这又带来了一些问题。除了光波以外，其他相同的波叠加时又会发生什么呢？我们经常看到人们在嘈杂的公共场所各自握着手机打电话，彼此互不干扰。同一座城市里，成千上万的人使用的手机都通过同样的无线电波传递信号。“泰坦尼克号”沉没时，海上的无线电通信受到了严重的干扰，因为这片海域内有20条船正在使用同样频率的波发送信号。但是今天，光是一幢楼里可能就有100个人在同时用手机打电话，信号却依然畅通无阻。这是怎么做到的呢？

请想象一下，你正站在高处俯瞰一座繁忙的城市。街上有个男人从口袋里掏出手机，碰了几下触摸屏，然后把手机举到耳边。假设你的眼睛有超能力，能看到不同波长的无线电波，它们在你眼中呈现出不同的颜色。绿色的涟漪以男人的手机为中心向四面八方扩散，手机就是最明亮的光源，涟漪越往外传播，颜色和亮度就变得越黯淡。

注意，100米外有一座移动电话基站，它探测到了这些绿色的光波，并对信息进行解码，识别了这个人要拨打的号码。接着，基站向目标手机发送信号，生成另一道绿色的涟漪——但它的颜色和先前那道无线电波有一点细微的区别。这就是现代远程通信的第一个秘密。

“泰坦尼克号”发送的信号实际上是不同波长的波混合形成的杂乱组合，但我们今天的技术已经可以精确地控制信号的波长。手机最初发出的信号波长是34.067厘米，而基站发信号使用的波长是34.059厘米。也就是说，手机和基站通信使用的波段可以精确到0.001厘米。我们的眼睛分辨颜色的能力都达不到这样的精度。

就像白纸上的红字和蓝字一样，这些波各行其道，互不干扰。男人在街上行走的时候，手机发出的绿光以特定的模式向外扩散，它携带的信号就这样传递出去。街对面的女人也在打电话，她使用的信号波长和刚才那个人只有一点点区别，但基站能分辨出这是两个不同的信号。政

府批准的带宽总有一个频段范围，在这个范围内，只要硬件条件允许，手机网络运营商可以分隔出许许多多个具体的通信频率，对应不同的波长。以超人的视角俯瞰城市，你会看到无数明亮的光点，那是许多手机正在各自收发信号。建筑物会反弹这些信号，周围的环境也会缓慢地吸收信号，但大部分信号仍能顺利传到基站。

我们观察的那个男人沿着街道行走，离基站越来越远。这里出现了新的颜色。他前方的街道上出现了红色，那是下一座基站的波。上一座基站强大的绿色信号逐渐消失，男人的手机探测到了新的频率，于是它开始和新的基站建立通信。男人还不知道自己已经走到了“绿区”边缘，但他的手机已经默默切换了波长，开始发出红光。绿基站收不到这些信号，但新的红基站已经接手了任务。如果男人继续向前走，他可能还会进入黄基站或者蓝基站的覆盖范围。相邻的两座基站绝不会采用同样的颜色，但要是男人走得够远，他或许会遇到下一个绿基站。这是手机网络的第二个秘密。人们会控制手机的信号强度，以确保它只传到最近的基站。这意味着只要多拉开些距离，基站就可以重复使用同样的频段。两个绿基站发出的信号都不强，无法传到对方所在的位置，所以它们不会互相干扰。

信息在基站覆盖的区域不断地流进流出，不同区域互不干扰。[59]我们之所以可以实现多人同时通话，是因为每个人使用的波长都略有区别。而在通信网络的另一头，接收方也不会搞混这些不同的信号。要是中间出了哪怕一点偏差，这些信号也无法完成任务。但现代技术达到了这样高的精度，我们可以通过最细微的差别来分辨不同的波。

我们每天就生活在这样的环境中。手机、无线网络、无线电台、太阳、加热器和遥控器激起的涟漪共享空间，从我们头顶飞过。这里还没算声波呢——大地发出的低沉声响、爵士乐、狗吠、牙医诊所用于清洁设备的超声波，还有我们吹凉茶水时激起的涟漪、海浪、地震带来的起伏……我们生活的地方时时刻刻都在制造各种各样的波。不少波可以帮助我们探测和揭示很多东西。从本质上说，这些波的性质完全相同。它们都拥有波长，会被介质反射、折射、吸收。只要理解了波的基本性质，领会了用波传输能量和信息的秘诀，那么你就掌握了现代文明最重要的工具。

●

2002年，我在新西兰基督城附近的一家驯马中心工作。一天晚上，电话突然响了，让我万分惊讶的是，这个电话居然是打给我的。那部电话有一台无绳分机，所以我拿着电话走出房间，坐在山坡上眺望薄暮中的新西兰乡村风光。电话那头是我的祖母。当时我差不多已经半年没回过英国了，而且一直没跟家里联系。祖母想跟我说说话，所以她在家里按下电话号码，立即就找到了电话另一头的我。祖母问我外面的食物吃不吃得惯，马儿的情况好不好，工作是否顺利。

我听着熟悉的乡音，却想到了别的事。我们的行星如此庞大，我所在的位置和我的家乡差不多正好分居地球的两端（两地直线距离12742千米，直飞里程至少有20000千米），但祖母却能通过电话直接跟我说话。要知道，我们之间隔着整整一个地球。这样的通话让我觉得十分神奇。如今，我们的星球上充满了各种各样的波。我们时时刻刻都在通过看不见的波与别人交谈。这是个了不起的成就，同时也有些怪异。马可尼等发明家的工作和“泰坦尼克号”沉没之类的事件推动了无线通信的普及，时至今日，人们已经对这类技术习以为常。我很庆幸自己出生得不早不晚，享受了这些伟大成就带来的便利，还会为此赞赏惊叹。我们的眼睛无法探测到这些波，而人类总是难以欣赏自己看不见的东西。不过下次打电话的时候，请好好想一想这件事。波真的非常非常简单。但如果能够好好利用它，我们可以把世界变得更小。

第6章

鸭子为什么不会脚冷

- 原子之舞 -

盐和糖的真面目

盐是一种再平凡不过的商品，它总是默默待在橱柜里，从来不会成为人们关注的焦点。不过，如果你有机会近距离观察一撮盐粒，尤其是在明亮的光线下，你会发现它简直熠熠生辉。你凑得越近，盐的反光就越强烈。要是再有一个放大镜，你会看到盐粒的形状也是有规则的，它的表面几乎没有任何凸起。每一粒盐都是一个美丽的立方体，表面光滑平坦，边长约半毫米。这就是它闪耀的原因。

这样的表面会像镜子一样反射光线，如果在光下移动这撮盐，你的眼睛就会看到来自不同盐粒的反射光。盐罐子里平凡无奇的调料实际上由无数微型雕塑组成，每座雕塑的形状都一模一样。这不是制盐者有意为之的结果——盐会自然地形成规整的形状，我们从中看到了关于物质结构的蛛丝马迹。

盐的化学成分是氯化钠，这种化合物拥有等量的钠离子和氯离子。[60]你可以把它们看成大小各异的球——氯离子的直径差不多是钠离子的2倍。在盐成形的过程中，每个离子都会在特定结构中拥有一个固定的位置。

你一定见过超市里的盒装鸡蛋，氯离子就像盒子里的鸡蛋一样整齐地排列成行，形成一张立体的网格，较小的钠离子就嵌在网格内的空间中。在这里，每个离子周围都会有6个不同类型的离子。盐晶体就是这样一张巨大的立体网格，网格的每一条边都由数百万个原子组成。这种晶体总是一层一层的，立方体的各个面始终保持平整。在原子的层面上，每种元素各安其位，完美无瑕。每个立方体的每一个平面都会像镜子一样反光。

我们看不到单个原子，却能看到它们组成的结构体现出来的样子。盐的整个晶体就是同一个模式不断地自我重复而形成的。盐非常简单，无论大小，盐粒内部的结构总是相同的。盐晶体光滑的反光表面之所以会存在，是因为在这套精确的网格系统中，每个原子必须出现在固定的位置。

糖也是这样的。近距离观察糖的晶体（尤其是颗粒较大的砂糖），你会看到更加美丽的景象。糖晶体是十二面体。糖分子由45个不同的原子组成，每个原子都有固定的排列方式。糖分子都长得一模一样，每一个糖分子都是晶体结构中的一块砖，不过这些砖块本身的形状非常复杂。和简单的盐晶体一样，糖分子也会以唯一特定的模式堆叠起来形成网格。我们同样看不到组成糖的原子，却能看到它们内在的模式，因为整个糖晶体是由同一个模式不断自我重复而形成的分子构建的一座摩天大楼。其表面也会像镜子一样反光，所以糖和盐一样晶莹闪亮。

面粉、大米和香料粉没有这么闪耀，因为它们的结构要复杂得多。这些食材由许多活生生的微型工厂组成，这些小工厂就是细胞。糖晶体和盐晶体之所以拥有平坦的表面，是因为它们结构单一，千千万万个原子以固定的模式排好即可。这两种物质的每一层都是对其他层的完美重复。当你舀起一勺糖放进茶里的时候，它的闪光总会提醒你这一点。

花粉和爱因斯坦

虽然无法直接看见原子，但我们能看到微观世界发生的事如何对我们的生活产生影响。不过首先，你得相信原子真的存在。

如今，我们觉得原子的存在天经地义。所有事物都由物质微粒组成，这个概念并不复杂，而且听起来很有道理，我们从小就一直听人这么说。但是，沿着历史的长河回溯，你会发现，就连1900年的科学界都没有完全确认原子的存在。那时候，摄影、电话和无线电的诞生已经拉开了技术时代的大幕，但“物质”到底由什么组成，人们仍未得出确定的结论。对很多科学家来说，原子的概念听起来很有道理。化学家早已发现，不同的元素似乎总是以特定的比例发生反应，如果从原子理论的角度去理解（比如，形成一个分子总是需要一个A原子和两个B原子），那

么这个问题就有了合理的解释。但总有人有所疑虑：你该如何确认这么小的东西真的存在呢？

几十年后的一句名言完美地概括了科学发现的典型过程，这句话出自科幻作家艾萨克·阿西莫夫（Isaac Asimov）笔下："在科学界，最激动人心的一句话，最有可能通往新发现的一句话，并不是'我知道了'，而是'唔……这很有趣……'"原子的发现完美地印证了这句话，不过这个过程花费了差不多80年。

我们从1927年开始讲起，当时一位名叫罗伯特·布朗（Robert Brown）的植物学家正通过显微镜观察悬浮在水中的花粉。有一些极小的微粒从花粉上脱落下来，这差不多是古往今来的光学显微镜能观察到的最小的东西。罗伯特·布朗发现，尽管水几乎完全静止，但这些微粒仍会在水中振动。起初他觉得这些微粒是活的，但是不久后他又在无生命的物质上观察到了同样的现象。这很奇怪，布朗找不到合理的解释，但他记录下了这件事。随后的几十年里，又有很多人观察到了同样的现象。这种奇怪的振动被称为"布朗运动"。它永远不会停止，而且只有最小的微粒才会表现出这种性质。人们提出了各种各样的假说，但谁也没有真正解开谜团。

1905年，瑞士的一位专利局职员以自己的博士毕业论文为基础发表了一篇新论文。此人就是大名鼎鼎的爱因斯坦。他最广为人知的成就当然是他对时空特性的研究，也就是狭义相对论和广义相对论。但他博士论文的主题是用液体测定分子的大小。在1905年至1908年，爱因斯坦为布朗运动做出了严谨的数学解释。

他提出了一个假说：液体由大量分子组成，而且这些分子总在不断地发生碰撞。根据爱因斯坦的理论，液体是一种无固定结构、动态变化的物质，液体分子时时刻刻都在彼此碰撞，每一次碰撞都会让分子的速度和方向发生变化。那么，如果液体中出现了一种比分子大得多的粒子，它会遭遇什么？显然，较大的粒子会受到更多粒子的撞击。由于这些碰撞完全是随机的，所以有时候粒子某个侧面遭到的碰撞更加猛烈，于是它会向相反的方向移动一点点。紧接着，如果向上的随机碰撞超过了向下的碰撞，粒子又会向上移动一点。因此，大粒子的振动背后是成

千上万个小得多的分子的碰撞。罗伯特·布朗看不到这些分子，但能看到较大的花粉微粒。爱因斯坦的描述完全吻合布朗的观察结果。既然如此，那么液体的确由大量不断碰撞的分子组成，单个的物质小团（原子）也必然存在。更棒的是，爱因斯坦还根据人眼观察到的振动预测了原子的大小。

1908年，法国物理学家让·佩兰（Jean Perrin）通过实验进一步验证了爱因斯坦的理论，他提供的新证据彻底堵住了怀疑者的嘴巴。世界的确由无数微小的原子组成，这些原子总在不停地振动。这两个发现互为表里，密不可分。原子的持续振动也不是偶然事件，后来我们发现，这可以解释宇宙中一些最基本的物理法则。

湿衣服和煎奶酪

确认了原子和分子的存在以后，我们就必须运用统计学手段来解释布朗运动之类的现象。你无法追踪单个原子的运动，也无法精确计算两个原子相撞时到底发生了什么，更无法追踪一滴液体中的数十亿个原子。我们只能从统计学的角度计算无数次随机碰撞可能造成什么结果。你不能断言布朗运动中的粒子一定会在某一刻向左移动1毫米，但你可以说，如果重复实验的次数够多，那么平均而言，某个粒子最后的位置可能会比初始时刻偏移1毫米。你可以非常精确地计算平均值，但也仅止于此。与1850年相比，现在的物理学变得复杂了，也变得清晰了。一旦你知道了原子的存在，许多司空见惯的东西都会变得有趣起来，比如湿透的衣服。

我第一次与BBC（British Broadcasting Corporation，英国广播公司）合作时参与了一档介绍地球大气和全球天气模式的节目。拍摄过程中，我体验了三天印度的雨季。这种气候现象规模很大，在全世界都很有名。印度每年都会出现周期性季风，在6月到9月引发大量降雨。我们之所以会去印度，正是为了介绍这么多水都是从哪儿来的。

我们驻扎在一栋小木屋里，木屋坐落在印度最南端喀拉拉邦一处非常安静的海滩上。拍摄的第一天显得格外漫长。雨季天气多变，而我们拍摄特定素材的时候需要天气状况在几个小时不变，这就很麻烦了。明

明刚才还是烈日当空，紧接着就是持续一个小时的暴雨，然后狂风刮来，艳阳又回到了空中。不过那里一直很暖和，所以我也不太介意淋雨。要是又湿又冷，那就完全是另一回事了。每次一下雨我都会被淋得浑身湿透，然后就得赶紧想办法弄干衣服，不然等到太阳出来了没法接着拍摄。作为需要入镜的人，我的难题在于每次出现在镜头上的时候我都得穿着同一件衣服。我找了个头顶有遮蔽物又能照到阳光的角落晾衣服，但穿穿脱脱几次下来，我感觉并没有多少时间真的在拍摄。我就这样费力地配合着节目需要，然而大约晚上7点的时候，天气又有了变化。这时太阳已经下山，我们只能收工。

我用力拧一拧，再拿毛巾擦一擦，湿透的上衣和短裤变得只是有点潮了。把衣服挂起来以后，我就去吃晚饭了。这两件衣服一直在外面晾到了第二天早上6点，也就是我们起床开工的时间。不过，当我把短裤收回来的时候，我发现它还是有点潮——甚至比前一天晚上更湿。不光是潮，衣服还变得很凉，因为晚上外面的气温很低。真糟糕！但我没有准备一模一样的衣服，所以只能重新穿上原先那一身，然后迎着朝阳在海滩上行走，试图让自己看起来还算精神，而不是冻得瑟瑟发抖。

一般而言，气体分子之间几乎不存在任何引力，所以无论容器有多大，它们都会向外扩散，填满整个空间。液体的情况就有点不一样了。液体分子也会像气体分子一样互相碰撞，但分子之间的距离拉近了很多。室温下，空气中气体分子之间的平均距离大约是单个分子长度的10倍。可是在液体里，分子之间几乎没有空隙。这些分子不断碰撞、振动，它们仍在运动，但速度比气体分子慢得多。所有这些决定了一点，液体分子更容易相互吸引，抱团形成液滴。分子的活跃程度也和温度有关。液滴的温度较低，分子运动的速度也较慢，此时它们更像是在贴着彼此挤来挤去。如果加热液滴，那么所有分子的平均速度都会变快，部分分子得到的能量会比别的伙伴多。

分子要想逃离液体，变成气体飞走，就需要足够的能量来摆脱其他分子。这个过程叫作蒸发。得到了足够从液体中逃离的能量，分子就会飘起来进入空气。我湿漉漉的衣服里有很多液态水，分子在液体中懒洋洋地运动，却没有足够的能量逃离这个环境。

在那三天里，我把弄干衣服的办法试了个遍。要把衣服晾干，你得创造一个环境，让液态水分子有机会得到足够的能量，这样它们才能飘走。在烈日炙烤大地时，液态水会吸收太阳的能量，水分子开始慢慢逃逸。而等到云层再次遮蔽太阳，我又陷入了必败的苦战。问题在于空气里的水实在太多，因为这里有来自大洋的湿润海风。太阳照在温暖的海面上，表层海水的温度上升，大海里的水分子也活跃了起来。海水的温度越高，分子运动速度越快。随着海面温度的升高，越来越多的分子得到了足够的能量，从液态变成了气态，而温暖潮湿的海风又把它们吹向陆地，吹到我们身边。

穿上被雨水浇湿的衣服，我的体温会加热衣服，让衣物中的部分水分子得到足够的能量蒸发出去，于是衣服会比原来干一点点。可是，空气中满满的水分子总有一部分会撞上我的衣服，然后沾在上面。有了这些生力军的加入，衣服又变得更湿了。衣服之所以老是干不了，是因为蒸发的水分子正好平衡了重新凝结的液态水。也就是说，这里的湿度达到了100%——每一个蒸发的水分子都会被另一个凝结的水分子取代。如果湿度低于100%，那么蒸发的分子数量就会大于凝结的分子数量。这个差值越大，衣服就干得越快。

晚上的情况更糟。随着气温降低，所有分子的运动速度都变慢了。空气里有些水分子变得迟缓，如果它们恰好碰到了我的衣服，就会变成液体分子赖着不走，而衣服里本来就有的水也很难蒸发出去。如果凝结的水分子多于蒸发的水分子，那么温度就达到了露点，这里的“露”指的是“露珠”。这种情况下，依然有一部分水分子可以蒸发掉，但在数量上比不上凝结的水分子。如果我能设法加热衣服，那么就能增加蒸发的水分子数量，也许足以扭转态势，让衣服变干。然而事与愿违，我只能和整个印度一起浸泡在湿漉漉的雨季里。

重点在于，这样的过程时时刻刻都在进行。观察某一个分子是蒸发还是凝结，这对于一件衣服的状态没有什么帮助。不过，如果从统计学的角度观察分子的变化，就算每个分子总在做不同的事情，我们也可以最终发现蒸发和凝结达到平衡的结果。

一团分子中不同的个体表现不同，这一点有时候非常有用，比如，

汗水蒸发时，逃逸的都是那些携带能量最多的分子，而留下来的分子则相对安稳，所以出汗有利于降温，因为逃逸的分子带走了大量能量。

一般而言，衣服变干的速度很慢，这是个平缓的过程。在水面上，某个能量特别多的分子突然得到了足够逃逸的能量，于是它飘了起来。不过在另一些时候，蒸发的过程比这激烈得多。狂暴的蒸发有时候也很有用，尤其是在做饭的时候，比如，“炸”这种烹饪方式就与水密切相关。

哈罗米奶酪是我最喜欢的油炸食品，我一直觉得它在素食者心目中的地位相当于食肉者眼里的培根。它的制作过程如下：先把油倒进平底锅，过一会儿再放入弹性十足的奶酪。油温静静地升高到了180℃左右，但除了散发热量，锅里的油和刚才并没有别的不同。不过，就在第一块奶酪进锅的瞬间，响亮的噼啪声打破了原来的平静。奶酪刚一接触热油，它的表层温度就在几分之一秒内升高，达到和油温接近的程度。奶酪表面的水分子突然从热油中得到大量的能量，远远超过了液体蒸发的需要。于是，这些水分子在汽化的同时快速膨胀，产生一系列规模极小的爆炸，在奶酪表面上形成一个个肉眼可见的气泡，这就是那一阵噼啪声的来源。

这些气泡还起着重要的作用。上面提到的过程会将油阻拦在奶酪的表面，使其无法浸入奶酪内部。传入奶酪的热量也得到了限制。如果油温过低，气泡形成的速度不够快，那就没法把油挡在外面，最后食物会被油浸透，变得十分油腻。在我们油炸奶酪的过程中，部分热量进入奶酪内部，让内里变热。外层则被高温剥夺了大量水分，被炸干了，变得脆脆的。奶酪中的蛋白质和糖在受热后发生化学反应，制造出迷人的焦褐色。从液态水到蒸汽的突然变化是油炸的核心。只要你在烹饪中操作正确，油炸食品一定会发出响亮的噼啪声。

海冰和“前进号”

我们周围随时都在发生气体与液体的相互转换，但液体和固体的转换就没那么常见了。大多数金属和塑料的熔点都远高于日常温度，而氧、甲烷和酒精之类的小分子熔点又很低，要让它们凝结成固体，甚至

需要特制的冰箱。相比之下，水的性质相当特殊，因为水结冰和蒸发的情况都很常见。不过，说到冰冻，大多数人立即就会想到南极和北极。那里总是洁白一片，严寒难耐，完全不适合居住，前往南北极的旅程堪称20世纪人类最伟大的冒险。冻结的水给探险家们造成了很多问题，不过有时候，它也会带来出乎意料的解决方案。

物质从气态变成液态的关键在于，分子的距离需要近到足以发生接触，却又能自由地相对流动。而液态变成固态时，分子的位置彻底固定了下来。水结冰就是最常见的例子，其实水结冰的过程相当独特。在冰天雪地的北极，我们可以清晰地看到其中的古怪之处。

如果有机会前往挪威最北方，站在海岸边向北远眺，你就能看到北冰洋。夏天，24小时不间断的阳光滋养着微型海洋植物形成的森林，季节性的自助盛宴引来了鱼儿、鲸和海豹。夏天慢慢过去，阳光也越来越苍白无力。

哪怕在夏天最热的时候，北冰洋的海面水温最高也只能达到6℃，随着极昼结束，这个温度还会下降。水分子的运动开始变慢。这里的水盐度很高，所以哪怕水温降到-1.8℃，它也能保持液态。在一个晴朗漆黑的夜晚，海水终于还是开始结冰了。或许最开始只是有一片雪花飘落在海面上，那些运动速度最慢的水分子一撞上雪花就跑不了了。不过，水分子附在雪花上的位置并不是随机的，每个新来的分子都会有一个合适的位置，原本杂乱无章的水分子逐渐形成晶体，每个分子都在六角结晶中找到了属于自己的角落。随着温度进一步下降，冰晶开始生长。

水结晶的过程有这样一个奇特之处：原本左冲右突的分子形成了有规律的固定结构，与此同时，它们占据的空间也变大了。绝大多数分子在站好队、变成固体时，分子间的距离都会缩小，水却不是这样。冰的密度小于周围的液态水，于是它漂了起来。正在凝结的冰层不断增大面积。如果冰的密度大于水，那么新形成的冰就会沉到水底，极地附近的海洋也会呈现出截然不同的另一番面貌。但在现实中，温度越低，冰层覆盖的范围就越广，海洋披上了一层白色固态水外套。

冰封的北冰洋上有许多令人叹为观止的东西：北极熊、冰和北极光。我尤其钟爱北极的一段历史故事，这个故事生动地体现了水凝结成

冰的独特之处，也展示了人类与自然合作而非对抗的历程。故事的主角是一艘矮墩墩的小船，它熬过了极地探险史上最艰苦的旅程，它的名字是“前进号”（Fram）。

19世纪末，探险家纷纷盯上了北极，这片土地离西方文明的距离已不再遥远。加拿大、格陵兰、挪威和俄罗斯的最北部都已有人踏足并完成了初步测绘，但北极点仍笼罩在未知的迷雾中。那里是陆地还是海洋？没有人到过北极点，所以谁也不知道答案。探险之旅失败了一次又一次，因为海冰总在不断地扩张、收缩和转移。有时，天气变化还会让海冰堆积起来，形成冰脊和裂缝。冰层的推挤足以将船只碾为齑粉。

1881年，美国军舰“珍妮特号”（USS Jeannette）在西伯利亚北海岸外的海冰中困了好几个月，对那个年代的北极探险船来说，这样的遭遇简直就是家常便饭。天气越来越冷，海水分子不断加入冰层，扩张的冰层紧紧冻住了船壳。接下来的几个月里，海冰在凝结和融化间反复，一下一下挤压船身。“珍妮特号”不堪重负，最终解体。被迫弃船的探险家们还将面临新的危险：海冰可能融化形成一片汪洋，不乘船就别想离开。北极圈周围所有国家的领土离冰雪世界都有好几百千米的距离，变幻莫测的海冰成了横亘在探险家们面前的天堑。

“珍妮特号”失事3年后，它的残骸被冲到了格陵兰岛附近。这是个令人震惊的发现，谁也没想到船只的残骸竟能穿越整个北极圈，从极地的一边漂流到另一边。海洋学家开始思考：是否有一条洋流从西伯利亚岸边一路穿越北极直达格陵兰？

挪威一位名叫弗里乔夫·南森（Fridtjof Nansen）的年轻科学家由此产生了一个大胆的想法。如果能造出一艘不会被冰碾碎的船，他就可以乘着这艘船前往西伯利亚“珍妮特号”沉没的地方，故意让这艘船陷入海冰的包围之中。3年以后，他或许会出现在格陵兰。关键在于，他在这趟旅程中可能会路过北极点。不需要艰苦跋涉，不需要扬帆远航，冰和海风自然会替你完成这项壮举。唯一的问题是，这需要耐心等待。这个主意传出去以后，有些人将南森奉为天才，还有一些人觉得他是个疯子。但无论如何，他都已经下定决心。南森筹了一笔钱，雇来了当时最优秀的造船工程师，因为这艘船必将不同于以前的任何船只。“前进

号”就这样诞生了。

这里难点在于，水冻结成冰时，水分子在规则的结构中排列整齐。只要温度够低，它们就会一直停留在原地。如果周围没有足够的空间容纳它们，这些分子就会想尽一切办法向外扩张，不惜推开任何挡道的物体。困在海冰中的船只必将面临这样的窘境：周围的冰层不断扩张，船只的容身之地越来越小。船只无法承受这些冰的挤压，而且北冰洋中央的冰层厚度可能远超人们的估测。

“前进号”以一种极其简单的方式解决了这个问题。这艘船设计得圆乎乎的，长39米，宽11米，船壳呈光滑的弧形，几乎没有使用龙骨，发动机和船舵可以直接抬升到水面上。冰挤过来的时候，“前进号”就变成了一个漂浮的大碗。如果你试图从下方挤压一个弧形底的器皿，那么它一定会向上运动。按理来说，如果来自海冰的挤压力量太大，“前进号”会被挤到冰面上，但不会损坏。这艘船是木制的，某些位置的木材厚达1米，船身的隔热效果也很好，舱内的船员不会受冻。1893年6月，“前进号”在万众期待之下载着13位船员离开了挪威，驶过俄罗斯北部海岸，来到“珍妮特号”沉没的位置。9月，它在北纬78°附近遇到了海冰，不久后，它就被海冰包围了。刚刚被冰围起来的时候，“前进号”发出吱吱嘎嘎的呻吟声，不过随着冰层的膨胀，它的船身渐渐被抬了起来，和工程师预计的完全一样。被海冰封冻的“前进号”就这样踏上了计划之中的旅程。

接下来的3年里，“前进号”随着海冰一起向北漂流，它移动的速度慢得惊人，每天只能前进约1.6千米，有时候还会倒退或者原地打转。周围的冰块不断推挤然后放松，“前进号”的船身也随之起伏不定。在此期间，南森一直在指挥船员进行各种科学测量，但缓慢的进展让大家越来越不耐烦。“前进号”抵达北纬84°的时候，人们已经非常清楚，它永远也到不了410海里外的北极点了。南森带着一位搭档离开船只，驾着雪橇试图前往“前进号”无法抵达的区域。

南森创下了北极探险的新纪录，但他最后到达的地方离北极点还有4°。接下来，他穿越北冰洋前往挪威，并于1896年在法兰士约瑟夫地群岛遇到了另一位探险家。“前进号”载着剩下的11位船员继续顺着海冰漂

流，它最远到达过北纬85.5°，距离南森创下的新纪录只有几千米。1896年6月13日，这艘船在斯匹茨卑尔根岛附近挣脱了海冰的束缚。

虽然“前进号”不曾抵达北极点，但它在旅途中留下的科学测量记录仍是一份无价的宝藏。人们由此知晓，北极是一片大洋而非陆地，北极点隐藏在变幻莫测的海冰层下，俄罗斯和格陵兰之间的确存在一条洋流。后来，“前进号”又载着船员完成了另外两次伟大的航程。第一次是在加拿大北极地区的测绘探险，为期4年。第二次是在1910年，它载着阿蒙森和他的队员前往南极，最后他们抢在斯科特船长之前到达了南极点。

今天，“前进号”静静地安放在奥斯陆的博物馆里，它已经成为挪威极地探险最伟大的标志。通过这艘船我们可以看到，人类没有硬生生地对抗海冰，而是借助它的力量，成功抵达了世界之巅。

冰块、玻璃和体温计

我们太熟悉冰了，甚至忽略了冰的膨胀。饮料里的冰总会浮起来，这样理所应当的场景就在告诉我们，冰比水密度低。我们还可以看到，结了冰的水依然是水，只不过会占据更多空间。如果你在透明的玻璃杯里倒一些水，然后加入几块比较大的冰，你会发现冰块大部分都在水面之下，只有大约10%的部分露在上面。你可以用记号笔在玻璃杯外面画一条线，记录此时的液面高度。问题来了：随着冰块慢慢融化，杯子里的水面会上升还是下降？冰块融化后，冻结的水分子全都会融入液体。这是否意味着水面将会上升？这个物理学游戏很适合鸡尾酒派对，只要你有足够的耐心（或者足够无聊），盯着杯子里的冰块看它融化。

答案很简单：水面的高度不会有任何变化。如果不相信的话，那你大可亲自尝试。冰块里的分子变成液体以后，它们之间的距离会变得更加紧密。刚融化的液体正好能填满它们作为冰块在水面之下占据的空间。之前冰块露在水面上的部分正是结冰后多出来的体积。你看不到紧密排列的原子，但是你可以看到它们结冰时额外占据的空间。[61]

从液态变成固态，意味着散漫的水分子排好了队，组成了晶体结

构。虽然这种晶体并不像王冠上的水晶一样闪闪发光，但它的确也是晶体。晶体内部的原子、离子、分子按固定方式排列。盐和糖都符合这个条件。

另一种固体内部的分子排列没有这么严格。这些固体在凝固的时候显得更加随心所欲。原子的排列都发生在微观世界里，我们根本不可能凭肉眼看见。不过有时候，我们完全可以通过宏观物体看到微观结构造成的影响，最明显的例子就是玻璃。

还记得8岁的时候，我和家里人一起去怀特岛旅行，在那里我第一次看到了吹玻璃的人。熔化的玻璃团闪闪发光，圆滑可爱，一刻不停地改变着形状。我瞬间就深深地迷上了这一幕，最后大人们不得不把我拖走，否则我能盯着这巫术般的场景看上整整一天。在工人的努力吹制下，玻璃团先变成气泡，又变成花瓶。直到很多年后，我才有了一个梦想成真的机会：我可以亲自尝试吹制玻璃了。2016年，一个寒冷刺骨的清晨，我和一位表亲走进了一座石头谷仓，在这间小作坊里，神秘的大幕即将拉开，魔术背后的秘密呼之欲出。

起初，一摊熔化的玻璃被装在一个小炉子里，发出明亮的光，因为它的温度达到了1080℃。在特制手套的保护下，我们小心地把长铁棍伸进玻璃池塘搅动，蜂蜜般黏稠的液态玻璃开始黏附在铁棍上。我们加热玻璃让它变软，静置液态玻璃，让重力拉着它向下滴坠，如果铁棍是中空的，还能在熔化的玻璃里吹泡泡。这些步骤比较简单，后面的工作会越来越难。

我们轮流练习了以上几项工作，并且惊讶地发现玻璃会以极快的速度自然变化。当玻璃离开炉子的时候，你必须用好铁棍，因为这时的玻璃很容易滴到地上。几分钟后，我们就能在金属工作台上擀压这团玻璃了，现在它的黏度和橡皮泥差不多。仅仅3分钟后，它会在工作台上发出清脆的响声——“叮”——和你印象中的固态玻璃一模一样。有趣之处在于，处理玻璃时，你摆弄的是顺滑柔软的液体。冰冷的固态玻璃只是变硬后的形态，就像童话里被冻结在时间里的人物一样。

玻璃的特质和内部原子的运动方式有关。我们吹制的是最常见的玻璃，也就是钠钙玻璃，它的主要成分是二氧化硅（SiO2），这也是沙子

的主要成分，但这种玻璃还含有少量的钠、钙和铝。玻璃内部的原子并未形成规则的队列，而是错综复杂地互相结合。每个原子都和周围的原子紧紧相连，没有太多自由空间。玻璃受热时，这些原子更是乱成了一锅粥，它们开始缓慢地分开。由于原子最开始就没有固定的位置，所以它们可以轻而易举地彼此滑动。我们把玻璃从炉子里倒出来的时候，玻璃内部的原子携带着大量热能，在重力的作用下很容易向下滑落。随着原子在空气中逐渐冷却，它们运动的速度会放缓，彼此间的距离变短，液体变得更加黏稠。

玻璃的妙处在于，在冷却的过程中，原子没有足够的时间形成规整的结构，所以它们索性顺其自然。原子间的距离变得越来越小，相对运动变得越来越慢，直至彻底停止，液态的玻璃也就变成了固体。你甚至很难说液态玻璃与固态玻璃之间有什么确切的界限。

我们的第一个任务是每人做一件小器皿，这真是个冠冕堂皇的说法。实际上我们只是一人吹了个玻璃泡泡，然后看着老师在每个泡泡上加了个熔化的玻璃环。吹泡泡的活儿不好干，我的腮帮子鼓得生疼，感觉就像拼命吹了个特别厚的气球。最需要技巧的是最后一步：把做好的器皿从铁棍上取下来。

经过一番拉扯和塑形，我的作品上留下了一段细细的颈，按理说事情就要收尾了。用锉刀在这段颈上磨出纤细的裂纹，然后把它送上成品工作台，轻轻敲击铁棍，玻璃器皿就会安稳地落下来。但是真动起手来，事情又没这么简单。新产生的裂纹迫不及待地急速扩大，导致器皿直接从铁棍上掉了下去。此时玻璃没有完全冷却，所以它两次从地板上弹了起来。老师赶快把它捡了起来，这件作品安然无恙，但脆弱的玻璃膜已经变了形。要是这玩意儿掉下去的时间再晚一分钟，玻璃的温度再下降一点点，那它铁定会摔个粉碎。

这就是玻璃的启示。原子的行为和温度有关。高温可以让原子自如地动起来。冷却冷却，原子们会更靠近，这时候玻璃能在地上弹跳。再冷却一些，原子就会完全站住。这时，任何变数都会在这脆弱的固体上制造出裂缝，这时候玻璃很容易被砸碎。

玻璃有着液体之美，但它又不像水那样难以控制。事实上，尽管软

化的玻璃很像液体，但它却是如假包换的固体。水泥地面上的弹跳泄露了这个秘密：固体才会有弹性，液体不可能具备这种性质。重点在于玻璃这种结构带来的特性：温度的变化很容易改变材料的表现。

现在我们或许应该澄清一下与玻璃窗有关的诸多流言。有人说，有300年历史的玻璃窗下半部分要比上半部分厚，因为随着时间的流逝，玻璃会缓慢地向下流动。这完全是无稽之谈。玻璃不是液体，它根本不会流动。之所以会出现下厚上薄的情况，是因为这些玻璃窗采用了一种非常精妙的制作工艺。人们将熔化的玻璃团绞在铁棍上，棍子以极快的速度旋转，将玻璃团摊成平坦的圆盘。[62]等到圆盘冷却下来，人们就会把它切割成窗玻璃。这种工艺的缺点在于，圆盘靠近中央的部分总会比外面厚一些，所以将它切割成玻璃窗以后，总会有一头要厚一些。人们在装玻璃窗的时候总爱把较厚的那头朝下安装，这样有利于快速排干雨水。所以，玻璃并没有向下流动，它本来就是那样的。

我们的玻璃器皿并没有直接放在外面冷却，而是被送进了回温炉过夜。炉子的温度会在整整一夜的时间里缓慢地降低，直至清晨到达室温。之所以要这样做，是因为即便玻璃凝成了固体，原子的位置仍然不是完全固定的。加热某件物品，即便升高的温度不足以让它从固体变成液体，内部的原子排列依然会发生细微的变化。玻璃器皿冷却时也会发生同样的事情：原子会发生位移。我们之所以需要回温炉，正是为了让这样的位移来得尽量舒缓一些、均匀一些。否则，失衡的力可能会让玻璃碎裂。这里有一条简单的定律：原子的位置或许是固定不变的，但相邻原子之间的距离却不是。受热的物体会膨胀。



现代的电子测量设备能带来许多便利，但也有不利的一面：离开了原始的测量手段，我们逐渐忘记了这些量度的本意。其中最令人伤感的例子就是玻璃温度计被电子温度计替代。

过去250年间，玻璃温度计一直是实验室和普通家庭的基本测量工具。现在你还能买到玻璃温度计，我在实验室里也使用它，但在很多地方，人们已经改用电子温度计。儿时记忆中闪闪发亮的水银柱早已被红色酒精取代，但从本质上说，现代温度计与华伦海特（Fahrenheit）在

1709年发明的设备并无区别。

华伦海特的温度计实际上是一根中空的细玻璃棍，其中一端膨胀形成一个小囊，里面装满了液体。将温度计的这一端放进需要测量温度的东西（比如洗澡水、腋窝、大海）里，你就可以优雅而便捷地完成任务。

温度越高，物体分子和原子运动越活跃，携带能量也越多。假设你把温度计放进浴缸，冰冷的玻璃管被热水包围，那么热水中快速运动的分子会撞击玻璃，把能量赋予玻璃的原子，让后者活跃起来。玻璃里面的原子不会乱跑，却可以在原地剧烈振动。就这样，玻璃的温度升高了。玻璃里的原子又会在活跃的振动中冲撞液态酒精分子，再次传递能量。于是，温度计的小囊开始升温，最后温度等同于浴缸里热水的温度。

所有物品在受热时都会膨胀，因为活跃的分子和原子需要更大的活动空间。但酒精分子膨胀的幅度比玻璃大得多。同样的温差下，酒精体积膨胀的幅度大约是玻璃的30倍。现在，小囊里的酒精需要更多的空间，于是它只能进入中空的细管里。酒精在管内上升的距离与酒精分子的受热情况直接相关，温度计上的刻度会做出合适的标定。如果小囊里的液体冷却下来，酒精分子运动速度减缓，需要的空间也随之缩小，达到的刻度线也会降低。一切就是这样精妙，通过玻璃温度计上的刻度，你可以直接读出原子无规则运动的剧烈程度。

不同材料受热后的膨胀率不同。打不开果酱瓶盖的时候，你可以用热水冲一冲整个瓶子。玻璃瓶身和金属瓶盖都会膨胀，但金属的膨胀率远大于玻璃。因此在受热之后，瓶盖更容易打开。尽管这些物体体积的变化小得微不可察，但你能够清晰地感受到变化的结果。

一般来说，固体受热时的膨胀率小于液体。这种膨胀看似微不足道，实际上可以产生很大的影响。下次步行经过公路桥的时候，你不妨注意一下，桥上每过一段距离就会有一道横贯路面的金属条。它可能由两块互相咬合的梳状金属板拼成。这是工程师为桥面膨胀预留的伸缩缝。你会发现这样的东西几乎无处不在。伸缩缝的意义在于，随着温度的升降，这根金属条允许桥面建筑材料发生轻微的膨胀和收缩，而不影

响桥面的平整。如果桥面膨胀，梳板的榫齿就会咬合得更紧；要是桥面收缩，榫齿就会松开一些，但不至于出现大的裂缝。

对温度计来说，受热膨胀非常实用，但在别的地方，这可能造成严重的后果。海平面上升就是这样的一个问题。由于温室效应，目前全球海平面上升的速度大约是每年3毫米，而且这个速度正在逐年加快。随着冰川和冰盖逐渐融化，曾经被封锁在陆地上的水正在回归海洋，所以整体而言，全球的海水总量正在增加。不过，这部分水对海平面上升的贡献大约只有总量的一半，另一半要归因于受热膨胀。海洋变暖，海水必然需要占据更多空间。目前最准确的估计是，全球变暖产生的额外热量大约有90%最终被海洋吸收，导致海平面上涨。

鸭子的绝活

南极高原的秋天静谧而安宁。北半球正沐浴在夏日的阳光中，南极大陆却被极夜的黑暗笼罩。在横贯这片高原的高山上，长达数月的极夜才刚刚开始。这里几乎没有雪花飘落，但地表的冰层厚度仍然达到了600米。这里的天气格外平静，来自大地的热量不断流失到星夜之中，没有任何阳光来弥补损失的能量。热量的入不敷出带来了超乎想象的低温，在这片高海拔山区，冬季气温时常徘徊在-80℃左右。2010年8月10日，某一片山麓的气温甚至下降到了-93.2℃，这是地球上有记录可查的最低气温。

雪花由细小的冰晶组成，而组成冰晶的是排列整齐的原子，这些原子会在原地振动，振动和能量、温度息息相关。如果要问最冷的冰有多冷，这里可以给出一个直白的答案：所有原子都静止不动的时候，物质就达到了最低温度。

要知道，至少在我们这颗星球上，即便是在没有光也没有生命的极寒之地，原子依然在发生微弱的振动。整个南极高原都由颤动的原子组成，如果将这里的温度提升到0℃，那么需要让现有能量翻倍。如果你设法剥夺一切能量，原子就会达到最低温度，也就是“绝对零度”，即-273.15℃。在这个温度下，无论周围是什么条件，任何原子都会彻底停止运动，也不再拥有任何能量。与绝对零度相比，哪怕是地球上最冷

的南极洲之冬也相当温暖了。

不过，让原子彻底停止运动其实非常困难。你必须花费很多心思来确保周围的任何物体都不会传来能量，有一点差池就会前功尽弃。尽管如此，仍有科学家殚精竭虑，想尽一切办法消除物质中蕴含的能量。这些科学家研究的是低温物理学，这并不像听上去那样没有实用性，医学成像技术的发展就得益于这类研究。

大多数人哪怕只是想一想极低的温度也会觉得很不舒服，看着鸭子赤脚在冰水里游来游去，你不免总会有几分困惑。

温切斯特是英格兰南部一座可爱的小城，城里有一座古老的大教堂，还有几家正宗的英式茶馆。漂亮盘子里装着分量十足的司康饼。夏天，五彩缤纷的花朵和蔚蓝如洗的天空将小城装点得像明信片一样漂亮。有一年，我和一位朋友在飘雪的冬日去了一趟温切斯特，结果发现了更加美妙的东西。我们把自己裹得严严实实，沿街一路向前，最后走到了一条小河边。河畔无人沾染的雪地仿佛两条洁白的毯子。在温切斯特，我最喜欢的不是那些石头建筑，也不是亚瑟王的传说，更不是司康饼。在那个冰寒彻骨的冬天，我执意拽着朋友去看的东西其实再平凡不过：我想看的是河里的鸭子。我们沿着河边小道在雪中艰难地走了一小段路，终于看到了此行的目标。

就在我们到达的时候，正好有一只鸭子摇摇摆摆地走过河边最后一段冰面，义无反顾地跳进了水里。然后它和周围的所有同伴一样，开始迎着流淌的河水，一边飞快地划动脚掌，一边低头在水中寻找食物。这一段河道相当狭窄，河水流速很快。鸭子在水下不深的地方就可以找到食物，但必须全力划水才能停留在原地进食。温切斯特的小河就是鸭子的跑步机，它们对这个游戏乐此不疲。所有鸭子面朝同一个方向不断划动脚掌，仿佛永远都不会停止。

我们旁边的一个小女孩低头看了看自己被雪覆盖的靴子，然后指着站在岸边冰面上的鸭子，问了妈妈一个特别棒的问题："它的脚为什么不会冷呢？"妈妈没有来得及回答，因为就在那一刻，真正精彩的一幕出现了。一只鸭子不小心游得离同伴太近，由此引发了一场混乱。两只鸭子嘎嘎乱叫，拍打着翅膀，激得水花四溅。有趣的是，混乱让这两只鸭子

都忘了划水，所以它们双双被河水冲往下游。几秒钟后，它们突然发现自己漂远了，于是这两只鸭子又迅速忘记了彼此的恩怨，开始奋力划水、逆流而上，试图回到刚才的位置。这耗费了它们不少时间。

河水的温度几近冰点，但这些鸭子似乎一点也不觉得冷。在那冰冷的水面下，鸭子拥有脚部保暖的独门秘方。要解决的关键问题关乎热的传递。如果你把高温物体放在低温物体旁边，那么高温物体中运动速度较快、携带能量较多的分子或原子必然会冲撞低温物体的分子或原子，从而将能量传给后者。于是，能量总是从高温物体向低温物体流动，一边是迟缓的微粒，一边是活跃的微粒，显然后者更容易感染和带动前者。

一般而言，如果不同温度的物体靠在一起，那么它们的温度最终会变得一样，这也是一种平衡。说到鸭子，我们首先要了解流经它们脚部的血液，这些血液来自鸭子的心脏。作为身体的核心，鸭子心脏的温度大约是40℃。当盛着温暖血液的脚丫进入近乎冰点的河水时，二者之间的温差会让血液失去能量。变凉的血液继续在身体里循环，必然和鸭子的整个身体产生温差，于是整只鸭子的温度都会下降。鸭子可以略微限制流向脚部的血量，但这不能彻底解决问题。实际上它们运用的是一条更加简单的法则：两件相互接触的物体温差越大，高温物体向低温物体散失能量的速度就越快。换句话说，两件物体的温差越小，能量的流动就越慢。这才是鸭子真正的秘诀。

鸭子快速划动脚掌的时候，温暖的血液沿着它的双腿动脉向下流动，动脉旁边就是静脉，后者负责把变凉的血液送回心脏。显然，温暖血液中的分子会碰撞动脉壁，动脉壁分子又会碰撞静脉壁分子。最终，能量从动脉血传往相邻的静脉血。流向鸭子脚部的动脉血会变凉一点，而流回心脏的静脉血又会变热一点。

沿着鸭腿继续往下，静脉和动脉的整体温度都会下降，但动脉还是要比静脉暖和一点。因此，在整个脚丫的任何一段，动脉血总会温暖相邻的静脉血。来自鸭子躯干的温度并不会只顺着动脉往下送，这些血液在输送的过程中一直在将自己的能量分给旁边的静脉血。等到动脉血最终到达带蹼的鸭脚时，它的温度已经变得跟水温差不多了。鸭脚并不比

河水暖和多少，所以它损失的能量也极其有限。而静脉血在向上流动的过程中则不断吸收来自动脉的能量。这个过程叫作逆流热交换，这种方式可以最大限度地减少能量的损失。只要鸭子能确保能量不流向脚掌，那么它的脚自然就不会成为能量散失的黑洞。鸭子之所以能够愉快地站在冰面上，正是因为它们的脚掌本身就是冷的。而且它们对此毫不在意。

动物王国中有不少物种独立演化出了类似的策略。海豚、海龟尾巴和鳍足里的血管也采取了相似的排列方式，所以它们在冷水中游动时也能有效维持体温。北极狐体内也是这种机制。这些狐狸的爪子需要直接接触冰雪，但它们仍能保证体内关键器官的温度。这种方法非常简单，却又十分有效。

我和我的朋友没有这些动物的本领，所以我们只在雪地里待了一小会儿。我们又看了另外几场争斗。表达了对这些鸭子的羡慕之后，我们就回去吃司康饼了。

滚烫的勺子和冰冷的食物

几代科学家从数千次实验中得出结论：热量的流动方向遵循一个简单的规则，总是从较热的物体流向较冷的物体。这是一条基本的物理学定律。不过，它并未给出热量流动的速度。把沸水倒入陶瓷马克杯的时候，你可以一直握着杯子的把手，直到里面的水彻底冷却下来。这个过程中你绝不会受伤，因为把手的温度不会升高太多。但是，如果你把金属勺子放进沸水里，然后一直抓着勺柄，那么几秒钟后你就会被烫得哇哇乱叫。金属传热的速度极快，而陶瓷传热的速度极慢。我们可以说，金属更容易被身边活跃的微粒所带动。金属和陶瓷的基本成分都是排列整齐的原子，这些原子都只能在原地振动，而不能随意流窜，为什么它们的导热性能差别如此巨大？

陶瓷杯体现的是靠整个原子传递振动的结果。正如我们曾经说过的，每个原子都会推挤身旁的原子，能量就这样沿着整道链条层层传递。你之所以能够抓着杯子把手而不会被烫伤，是因为这种方式传递能量的速度很慢。而且，大量能量来不及传到你的手上就已流失到空气

中。陶瓷、木头和塑料都是热的不良导体。

金属勺子却走了一条捷径。和陶瓷一样，金属原子要老实地待在原地。不同之处在于，每个金属原子的周围都有几个活泼的电子（我们稍后会聊到电子）。相邻的金属原子可以轻而易举地交换电子，这是陶瓷原子做不到的。金属原子只能乖乖站在队伍里，这些电子却能在整个结构中往来穿梭。它们在所有金属原子间形成了一片电子之海，一有风吹草动，立马波涛汹涌。金属导热的关键就在这里。

你将沸水倒进杯子里的时候，灼热的水分子会将部分热量传递给陶瓷杯壁，这些热量又会缓慢地从一个陶瓷原子传向下一个原子。而对于金属勺子来说，接触热水不仅仅意味着水分子的振动会传递给固定在原地的金属原子，还意味着电子之海开始动荡。小小的电子在金属结构内以极快的速度运动。当电子在金属勺子内部四处流动时，它们传递热振动的速度要比完整的金属原子快得多。电子以极快的速度将热量传到勺子顶端，整个金属勺子的温度随即升高。

不同金属的导热速度也不一样。铜的导热性能更好，铜勺传热的速度大约是钢勺的5倍。因此，有些烹饪锅具的锅身是铜的，柄却是铁的。人们希望铜质锅身能够快速均匀地将热量传递给食物，却不希望锅柄也被烧得滚烫。

一旦证明了原子的存在，你自然会好奇这些小东西在不同的环境里会有什么变化。这直接引出了下一个问题：“热”是什么？当我们提到传热时，“热”似乎是一种液体，在各种物体之间流动。实际上，“热”是一种动能，不同的物质发生接触时，这种动能会在它们各自的微粒间分享。温度是直接体现这种动能的量度，我们可以利用不同的材料（比如导热性能良好的金属和导热性能很差的陶瓷）来控制热能在不同物体之间的分配。细想之下，你不难发现，控制温度对人类社会而言至关重要，极大地影响着我们的生活。人类花了很多时间来为自己保暖，与此同时，食品药品行业又为制冷投入了大量人力物力。在本章的末尾，我们不妨了解一下各式各样的冰箱和冷冻机。

奶酪受热时，它内部的分子会变得活跃，能量增多，这意味着可用于化学反应的能量也增加了。也就是说，奶酪表面的微生物可以开动身

体内部的工厂，开启腐坏的进程。因此，我们需要冰箱。冰箱冷却了食物，安抚了分子，微生物的能量来源也被掐断了。所以冰箱里的奶酪比室温下的奶酪保存得更久。冰箱真是了不起，它可以让外部的空气更热，内部的空气更凉。[63]

低温有利于食物的保存，因为这样限制了分子的变化。你不妨想象一下，没有冰箱的生活会是什么样。你失去的绝不仅仅是冰激凌和冰啤酒。你得大幅增加购物的频率，因为买回来的蔬菜总是放不了两天就会坏掉。要想吃到牛奶、奶酪或者肉类，你必须住在农场附近；要是想吃鱼的话，就不能离海边太远。新鲜的蔬菜沙拉只有在应季的时候才会出现在餐桌上。我们可以利用酸渍、干燥、盐腌、罐装等办法保存部分食物，但无论如何，你都没法在12月吃到新鲜番茄了。

超市背后隐藏着仓库、船只、火车和飞机组成的一整套冷藏供应链系统。在罗得岛采摘的蓝莓也许一周后就会被送到加利福尼亚州出售，从离开枝头到送上超市货架的整个过程中，它都不可以从周围的环境中得到足以升温的能量。正因如此，我们才相信自己买到的食物是安全的。需要冷链配送的不仅仅是食物，很多药品也需要保冷。疫苗在温暖的环境中特别容易失效，发展中国家推广疫苗的一大障碍正是他们难以保障全程冷链。环环相扣的冷链在我们这颗星球上纵横交错，连接着农场、城市、工厂和消费者，人们厨房里的冰箱和医生手术室里的冷冻机不过是这条长链的最后一个环节。牛奶一离开奶牛的身体就会进入工厂进行巴氏消毒处理。而它下一次受热八成得等到你打开盒子准备做热饮的时候。在整个冷链配送的过程中，牛奶中的分子一直维持着低能量的状态，能让牛奶腐坏的化学过程几乎被彻底关闭了。我们不让分子活跃起来，通过这种方法来保证食品安全。

下次往饮料里加冰块的时候，你可以观察一下冰块融化的过程。你可以想一想，在热量从水流向冰块的过程中，微不足道的原子如何传递能量。哪怕看不到原子，你依然能够发现它们对周边的事物造成的影响。

第7章

勺子、旋涡和“伴侣号”

- 旋转定律 -

旋转中的稀奇事

泡沫的妙处在于，你知道它总会浮到最上面。它们要么像鱼缸和游泳池里的气泡一样上浮，要么像香槟和啤酒沫一样聚成一团待在液体上方。泡泡最后似乎总会升到液面的最高点。其实这里也有例外。下次搅拌杯子里的茶或者咖啡的时候，请好好看看杯子。就在你转动勺子的时候，水面上发生了不寻常的事：茶水的表面形成了一个洞。随着液体的旋转，茶水中央向下凹陷，靠近杯壁的部分则会上升。浮在茶水表面的泡泡全都跑到了这个洞的最底下。现在，茶水与杯壁相交的地方才是液面的最高点，但泡沫并不会出现在这里，反倒跑到了液面的最低点，再也不肯挪窝。就算你把泡沫拨开，很快它又会固执地回来。液面边缘产生的新泡沫也会打着旋儿流向中间。真是太奇怪了。

你用勺子搅动茶水的过程实际上是在推挤杯中的液体。勺子将茶水向外推，但茶水的运动距离非常有限，因为不远处就是杯壁。如果你在游泳池里搅动勺子，被搅动的水就会毫无阻碍地向前运动，最终和游泳池里的水融为一体。但小小的杯子里没有足够的空间，坚硬的杯壁会毫不留情地把撞上来的液体挡回去。杯壁就是一堵墙，茶水无法逾越它。既然茶水无法直线运动，它就会沿着杯壁开始打转。在这个过程中，茶水还会沿着杯壁向上冲。茶水会锲而不舍地试图走直线，它之所以会转圈，完全是被逼无奈。

这就是旋转物体教给我们的第一课。如果你突然撤掉了障碍物，那么它们一定会按照障碍物消失那个瞬间的方向继续向前运动。想象一下掷铁饼的运动员，他们抓着铁饼原地旋转，转上几圈以后，铁饼的速度已经变得很快了，但它仍将保持旋转运动，因为运动员将它紧紧抓在手中。运动员不断对铁饼施加拉力，拉力的方向沿着他的手臂指向旋转的

中心。就在运动员松手的那个瞬间，铁饼笔直地向外飞出，它的速度和方向与运动员松手的前一刻一模一样。

被搅拌的茶水中央之所以会形成一个洞，是因为每一滴茶水都试图沿直线运动，但由于杯壁的阻挡，它只能沿着杯壁向上爬，所以杯子中央的茶水变少了。就算你停止搅拌，这个洞也不会立即消失，因为茶水还在旋转。当液体旋转的速度逐渐变慢，杯壁附近的茶水不再往上冲，自然就落下来了。液面中央的洞也随之慢慢填平。你可以通过液体观察到这个过程，因为液体可以自由地运动并改变形状。

液面中央的泡泡也会随茶水旋转。它们之所以会出现在杯子中间，其实是因为这个地方大家都不愿意待。如果你把一杯啤酒放在桌上，啤酒泡沫一定会漂在杯子最上方，因为这时啤酒喜欢待在杯底，软弱的泡沫对此毫无办法。茶水也遵循同样的道理。泡泡之所以会出现在中间的洞里，是因为水正忙着往杯壁上冲，于是泡沫被挤到了没有水的洞里。液体的密度大于气体，所以在分派位置的时候，液体总是比气体更有选择权。

我们身边有很多旋转的物体：干衣机、正要脱手的铁饼、腾空翻转的煎饼，还有陀螺仪。另外，地球绕太阳公转的同时也在自转。旋转至关重要，因为它能帮你做很多有趣的事，这有时会牵涉大量的能量和力，而且一切都局限在较小的范围内，最糟糕的结果无非就是原地踏步。不要小看茶水里的现象，同样的原理还能解释很多事情。为什么不在南极发射火箭？医生通过什么办法来检测患者体内的血红细胞数量？未来的电网什么样？了解了旋转的原理，你就能知道这些问题的答案。不过，你首先需要明白，旋转中的物体无法直线运动。

自行车和弯道飞行

旋转的物体需要一个指向圆心的力迫使它不断改变方向，这是一个放之四海而皆准的道理。如果失去了这个力，物体就会停止转圈，转而沿着直线运动。因此，要想转圈圈，你必须设法得到一个这样的力。物体运动的速度越快，需要的力就越强，因为旋转速度快的物体更难控制。

运动会的举办方总喜欢把观赏性强的项目放在环形赛道上进行，因为让运动员在绕圈中完成比赛有几个妙处。参赛者可以尽情提速，场地绝对够用，付了钱的观众绝不会看不见比赛。为了确保参赛者获得足以让他们停留在赛道上的向心力，某些项目的赛道会修成有倾斜角度的弧形弯道。自行车室内场地赛就是个典型的例子。不过，在我尝试这项运动的时候，真正吓我一跳的不是赛道的长度，而是它的坡度。

我从小就是个狂热的自行车爱好者，但在室内场地骑车和平时的骑行完全是两码事。伦敦奥林匹克自行车馆内部光线明亮，空间开阔，而且十分安静。我的出现打破了寂静，他们为我准备了一辆看起来异常纤细单薄的单速自行车，没有刹车，而且我从没坐过这么难受的车座。指导新手的讲解结束后，我们踩动脚踏板，沿着赛道开始骑行。赛场看起来真是大极了。环形赛道有两条较长的直边，骑到直边尽头，高耸的弧形弯道出现在我们眼前。弯道非常陡峭（大约有43°），我觉得设计者想修的其实是一堵墙。这样陡峭的斜坡看起来完全不适合骑行，但我们的小队已经无路可退，只能向前。

我们先在主赛道内侧平坦的椭圆形场地展开练习。这里的地面很光滑，车骑起来感觉不错。然后，我们在教练的指引下向外挺进，开始踏上微微有一点坡度的浅蓝色地带。接下来，就像学飞的雏鸟一下子被推出鸟巢，我们也得攀上陡峭的主赛道了。

我立即体会到了惊慌的感觉。我原本以为弧形赛道的坡度是渐变的，结果却发现自己想错了，赛道最低处和最高处的斜度完全一样，只要踏上主赛道，你就得面对陡峭的斜坡。我不知道这算不算直觉，总之我逼着自己的脑子做出了符合逻辑的判断：骑得更快一点似乎是个好主意。骑了三圈以后，我彻底忘记了屁股下面的车座到底有多不舒服。我们骑了一圈又一圈，就像巨型转轮里疯狂的仓鼠，偶尔我们也会停下来，让教练检查大家的情况。整整25分钟的时间里，我在惊慌中不断学习。

这里的关键在于，你希望自行车倾斜，让车身尽可能地垂直于坡面。在做到这一点的同时，你还不想从斜坡上掉下来，唯一的办法就是加快速度。这背后的原理和旋转的茶水完全相同。自行车始终倾向于水

平直线前进，但这个愿望却无法实现，因为赛道是弯曲的。赛道的阻碍为自行车提供了垂直于赛道的支撑力，再加上重力的影响，你受到的合力最终指向赛道构成的圆心。这个力不小，你只能加快速度，让它把精力全花在维持旋转上。如果它还有余力，自行车就会被它拽倒。我当时感觉就像在墙上骑车，好在我骑得还算稳当。

我早就知道这些现象背后的理论了，但亲身体验又得到了一点不同的感受。刚开始，你根本没有机会休息，你得猛蹬踏板才能把自行车带动起来。不过，达到一定的速度之后，你要做的就是维持节奏了。有那么几次，我想停下来歇一会儿，就像平时在路上骑累的时候一样。但我知道，放慢速度，我很容易摔倒。我的身体立即分泌大量肾上腺素，我又重新开始疯狂地踩动踏板。这种自行车完全无法靠惯性滑行，你必须不停地蹬踏，无论双腿有多累。只要稍微放慢一点速度，你立即就会从赛道上往下滑。亲身尝试以后，我立即对每天进行场地自行车训练的运动员产生了由衷的敬意。我觉得敢于尝试赛道骑行的人也同样值得佩服。在这样的赛道上，想超车就必须绕远路，你要比对方快得多才有可能争取到一个机会。幸好我们不是比赛，不用老惦记着超车，对此我感到十分愉快。

这次体验告诉我，只要方法正确，那么坡度越陡，它赋予你的向心力就越强大。在弧形赛道上骑车需要这样的力，在直道上骑车则不需要，因为只有在弧形赛道上你才需要转向。转向的速度越快，需要的向心力就越大。让你自然跑完陡峭弯道的速度，在平坦的弧形赛道上会把你甩出去。这是因为平坦赛道可以提供的向心力（轮胎的摩擦力）无法驾驭那样的速度。自行车运动员不甘心让室内场地赛的速度局限在摩擦力允许的范围内，陡峭的弧形赛道解决了这个问题。

赛道向内支撑自行车运动员，大地向上支撑我们，这两种现象背后的原因完全相同。要是脚下的大地突然消失，你就会掉下去，因为重力会向下拉扯你。也就是说，地面实际上为我们提供了一个向上的推力，以此来对抗重力的拉扯。骑行者会在赛道上同时感受到向上、向内两个方向的推力，换句话说，重力同时赋予了他们向下、向外的拉力。

有一项场地自行车赛的名字非常贴切——飞行200米计时赛（flying

200-metre time trail）。我觉得参赛者一定能体会到飞翔的感觉。而这项比赛之所以叫这个名字，是因为参赛者在计时开始前就已经达到了极高的速度。在我写书的时候，这项比赛的世界纪录是9.347秒，由弗朗索瓦·佩维斯（François Pervis）创造。这个速度相当于21米/秒，或者77千米/小时。当他以这样的速度经过弧形弯道时，一定体会到了飞的感觉。

正如我们在第2章中看到的，作为一直存在的力，重力会影响万事万物，不过有时候你要等待很久才能看出它的效果，静置奶油分层就是个例子。在这里，旋转给了我们新的选择。要想增加重力，你不必大费周章前往另一颗行星。在抵达赛道最高处时，自行车运动员感受到的重力就会变大。不过，地球上最优秀的场地自行车运动员也只能达到77千米/小时的速度。在其他条件下，旋转速度是可以不断创造新高的，只要有足够的向心力。

离心机和宇航员

第2章讲过，重力可以让脂肪从牛奶中分离出来，漂到瓶子的最顶端，还记得吧？自然完成这个过程需要几个小时。但是，如果你把牛奶放进一根飞速旋转的长管子里，那么强大的离心力就会在短短几秒内将奶油液滴分离出去。这就是现代乳品业提取奶油的方法。静置分离的速度太慢，现代食品制造业没时间去慢慢等待。离心力和转动的物体如影随形，它的强度取决于转速。这就是离心机的原理：离心机的核心结构是一条能够固定物品的旋臂，向心力推动旋臂转动时，物体就会承受强大的离心力。

只要施加的向心力够强，离心机就能分离出单靠重力永远不可能分离的物质。以验血为例，血样会被医务人员送进离心机。离心机高速旋转时，血样承受的离心力可能达到重力的2000倍。红细胞的密度较大，但体积很小，正常情况下单靠重力我们永远不可能把它分离出来，但这些细胞无法抵御离心机产生的强大力量。在这种条件下，只需要5分钟时间，几乎所有红细胞都会离开离心机的中央，聚集到采样管底部。这时，工作人员就可以取出采样管，通过沉积层的厚度直接测量红细胞在血液中所占的百分比。这种简单的测试能够反映一系列健康问题，同时

还可检查运动员有没有服用兴奋剂。如果没有旋转产生的离心力，那么这样的测试会比现在难得多，也贵得多。除了小小的血样以外，离心力还能作用于更大的物体。世界上最大的离心机甚至能转动一个活生生的人。

不少人对宇航员的生活羡慕不已：他们能看到地球的壮丽景色，还有机会摆弄各种各样的高科技，积攒数不清的精彩故事，无论走到哪里都会引来一阵艳羡，因为他们从事的是世界上最罕见、门槛最高的工作。不过，要问大家最羡慕宇航员的哪一点，大多数人都会回答：失重。在没有“上”“下”之分的空间中自由飘浮，听起来轻松而令人向往。

我接下来要说的事实可能会让你感到惊讶：宇航员在训练中需要为失重状态的反面做准备，也就是说，他们必须承受额外的重力。目前进入太空的唯一方式是乘坐火箭，而火箭会产生超高的加速度。从太空返回地球的旅程更艰难，宇航员需要承受重力4～8倍的力量。在地球上，也许只有高速转弯状的战斗机飞行员会面临同样的状况。如果你在电梯加速时都会觉得有点反胃，那么这份工作不适合你。在飞船速度急剧变化的过程中，人的大脑会面临大量血液涌入或是涌出的情况，体内的一些毛细血管甚至可能因此而爆裂，这些细节实在谈不上愉快。但宇航员不光要受得了这些，还得工作，这一点在飞船驾驶员身上尤为明显。好在人是可以习惯成自然的，于是人们想出了训练宇航员的方法。

加加林宇航员训练中心在莫斯科东北面的星城，所有宇航员都要在这里接受长时间的训练。除了教室、医学设施和飞船模拟器以外，中心里还矗立着一台TsF-18离心机。这台离心机安装在一个宽敞的圆形大厅里，它的旋臂长达18米。旋臂尽头的舱室可以根据当天的训练需求进行更换。坐在舱室里以每圈2秒或4秒的速度旋转，这是所有受训宇航员的必修课。这个速度听起来似乎不算快，但要是仔细计算一下，你就会发现舱室每小时实际要跑100～200千米。

经过初步的适应后，宇航员开始学习在这样的环境中工作，工作人员会监控他们的身体状况。需要坐离心机的不光是宇航员，试飞员和战斗机驾驶员也得接受这种训练。中心甚至为付得起钱的普通大众提供了体验式课程。不过，请务必小心：所有人都一致同意，这门课会让你非

常难受。当然，要是你真想试试持续承受极强的力是什么感觉，那么离心机的确是个不错的选择。

人们通过离心机利用物体在旋转时所受的力，营造了一种人造重力。除此以外，旋转的物理学原理还有另一种利用方式。茶水、自行车运动员和宇航员的旋转都被局限在一个极小的范围内，有一道坚固的藩篱阻止了继续向外的运动。要是没有这道藩篱又会怎样？这样的场景并不罕见。橄榄球、旋转陀螺和飞盘都是无束缚的旋转物体。不过，要探讨这个问题，我们可以采用另一种更加有趣的道具，而且它还能吃，那就是比萨。

飞饼和地球自转

在我看来，完美的比萨应该拥有一层薄而脆的饼皮。饼皮看似朴素，却是必不可少的，只有好的饼皮才能衬托出馅料的光彩。刚开始制作时，比萨饼只是个圆乎乎的面团，厨师通过揉搓和发酵让它呈现出最美好的一面。要把面团摊成薄薄的饼，却又不能让它破掉，这是每一位师傅都要修炼的功夫。甚至有人更进一步，将这门基本的技巧变成了艺术。这些“飞饼大师”学会了用旋转来完成任务——既然物理学知识能搞定琐事，又何必一点点地揉搓面团呢？何况，空中飞舞的饼皮还会让厨师看上去神秘而有趣。

抛掷比萨面团逐渐演化成了一门颇具观赏性的运动，现在已经有了一年一度的世界大赛。甚至有一群人自称“比萨杂技演员”，他们的拿手好戏就是让一张（或者两张）比萨饼皮在空中飞转，甚至让饼皮绕着表演者的身体翻筋斗。当然，这种表演用的比萨最后应该没人吃，但空中飞舞的面团的确让人印象深刻。也有不少厨师只是老老实实地运用旋转的力量来加工饼皮，而不搞这些花哨的把戏。在这里，旋转到底有什么魔力呢？

最近，几位爱吃比萨的朋友带我去了一间很不错的餐馆，他们的厨房是开放式的。我说我想看看怎么转比萨饼皮，几位年轻的意大利厨师笑了几声，然后推举出了一位勇敢的志愿者。那位厨师腼腆而自豪地走到人群中央，开始拍打、压平面团。然后，厨师托起面团，从中间轻轻

一拨，整个面团开始在空中旋转。

接下来的一切仿佛发生在电光石火间。面团转着圈离开了厨师的手，突然间它自由了，没有谁的手会对它施力了。为方便解释这个过程，我们来看一看面团边缘的一个点。此时它正在做旋转运动，这是因为面团的其余部分紧紧粘着它，向它施加了一个向心力。不过，这时面团旋转的速度过快，超出了原有向心力的承受能力，面皮上的各个点向边缘拉扯，试图逃离中心，像脱手的铁饼那样飞出去。但面团是柔软可塑的，受到这样的拉扯之后，它会变得更加平展。面团的边缘受到了中心的拉扯，这也意味着拉扯的力贯穿了整个面团，整个面团的形状都会变化。

任何旋转的固体内部都会产生你看不见的力。维系比萨完整的内部力量同样拉扯着面团，所以面团的边缘开始变得离中心越来越远。厨师最重要的技能就是尽量让面团内部的拉力保持平稳均匀。整个比萨面团都在旋转，所以它的边缘也会均匀地向外伸展。

有时候你自己也能感受到这种看不到的力。你可以抓住一个装有重物的袋子，然后水平伸直手臂开始原地旋转。你会感觉到有一股力量在拉扯你的胳膊，这正是维系袋子转动的向心力。对你来说幸运的是，手臂的延展性没有比萨面团那么强，所以它的长度不会变。不过，胳膊越长、转速越快，你感受到的拉力就越强。

比萨面团在空中旋转时就会经历这种拉扯，并且因此变得扁平均匀。我估计面团在空中的时间还不到1秒，但它在抛起来之前还是一块厚厚的面饼，落下来的时候却已经变成了薄薄的圆片。厨师还在继续旋转面团，再次将它抛向空中，但这一次，由于内部的拉力太强，面团自己从中间撕裂了，最后掉下来的是一块破破烂烂的面片。厨师不好意思地笑了笑。“所以我们一般不会公开表演这个，”他说，“最好的比萨面团都很软，不适合旋转，所以我们必须手工把它擀开。”[64]于是我们发现，那些杂技大师使用的面团都有特殊的配方，它的延展性和强度都特别好，但用这样的面团烤出来的比萨就不敢恭维了。比萨边缘受到的拉力是重力的5～10倍，所以旋转成型的效率远高于举起面团让它在重力作用下自然拉伸摊薄。

旋转的比萨饼皮看起来赏心悦目，因为看不见的内力塑造着它的形状。从橄榄球到飞盘，在转动的时候，任何物体从中心到边缘都会有力量在拉扯。但你不会在坚硬的固体上看到这种力带来的影响，因为那些东西不容易拉伸，或者说，它们拉伸的幅度很小，你根本看不出来。不过，所有旋转物体都会拉伸一点点，就连地球也是这样的。



地球绕着太阳公转，与此同时，它也在不停地自转。其实地球经历的过程和比萨面团很相似，因此地球上的每一块岩石都能沿弧线运动。对我们来说幸运的是，地球上的重力还算强大，所以我们生活的星球依然是球形的，并不会变得跟比萨面团一样扁平。不过，地球还是像个吃多了的胖子似的，有了赤道隆起。

如果你站在赤道上，那么你与地心的距离比北极离地心的距离要远21千米。重力将我们的星球凝聚成形，但日常旋转赋予了它现在的形状。正是这个原因，虽然珠穆朗玛峰是地球上的最高峰，但它的峰顶并不是地表距离地心最远的点，实际上，这份殊荣属于钦博拉索山，它是赤道上的一座火山。钦博拉索山的海拔只有6268米（珠穆朗玛峰是8848米[65]），但它正好位于赤道隆起的最高点。假设有人挣扎着爬上了珠穆朗玛峰顶，而你只是站在钦博拉索山顶，这时你距离地心的距离就比他足足多出了2千米。

旋转主要有两种用途。比萨饼皮采用的是其中的一种——如果旋转的物体外部没有任何束缚，那么它就会有向外伸展的倾向；而自行车运动员采用的是另一种——用一堵墙挡住旋转的物体，借用障碍物的力量完成旋转。不过，无论是离心力还是向心力，它总得有个来源。如果关键的力消失了，物体就无法继续转动。

只有固体才会成为一团，液体和气体不会像面团那样挤在一起。[66]这一点是可以加以利用的，尤其是在面对液体和固体混合物的时候。你可以想办法把它们分开。旋转烘干机的原理就是这样，衣物的运动范围被限制在圆桶内部，圆桶会向它们施加一个向内的力，所以这些衣服必然会不停地旋转。与此同时，衣物里的水分却可以不受限制地自由运动，所以它会透过织物的缝隙不断向外移动。除非外面有固体阻

挡，否则这些水必然会远离中心，最终通过圆桶上的孔向外飞出，彻底脱离圆桶的旋转运动。

投石车和人造卫星

转动某件物体然后放手，这个过程的本质是这样的：起初，你赋予了物体一个向心力，于是它开始转动；然后，你突然不再用力，向心力消失，物体没有理由继续旋转，所以它就会沿直线向外飞出去。这个原理改变了中世纪欧洲和地中海东部地区的战场面貌，以此为基础，工程师们开始建造足以摧毁石堡的巨型攻城设备。我也曾运用这个原理来发射长筒雨靴，但最后的结果不太理想。

那年我即将博士毕业，教授们告诉我答辩已经顺利通过，桌子后面的校外主考官微笑着问我下午剩余的时间打算干点什么。显然，他觉得我多半会去参加庆祝派对，但我的回答出乎他的意料。我打算骑自行车去乡下，看看能不能找到一位老乡借给我一两个拖拉机旧轮胎。我解释说，我正在做一个投掷长筒雨靴的小玩意儿，必须用废旧材料制成，而且必须在下周之内完成。考官狐疑地皱了皱眉，然后他圆滑地假装刚才的对话完全没有发生过，转而问我下面有什么工作计划。

我说的是实话。我准备参加一个名叫“垃圾堆挑战”的路演活动，我所在的团队全是女成员，这不常见。这次的挑战是建造一个能够投掷长靴的装置，这件作品将在多塞特蒸汽机节（Dorset Steam Fair）上参赛。我们团队只有三个人，我们既没钱也没有太多时间，要实现这个目标，我只有一个法子：复原古老而高效的投石车。

投石车是一种相当精巧的设备，几百年内它在不同的文明之间流传，在传入西欧之前，古代中国、拜占庭和阿拉伯帝国都曾使用过这种武器。在11世纪和12世纪，投石车已经完全展露出狰狞的面目，它能够轻而易举地摧毁坚固的城堡。投石车能将重达100千克的石块扔到几百米外，这种攻城器械直接导致了莫特贝利式城堡的消失。这种堡垒不是没有战略价值，但那种泥土和木头构成的结构太脆弱。只有坚固的石头才能有效防御投石车的进攻，所以石堡逐渐成为主流。

中世纪战士也好，我们的团队也罢，无论对谁，投石车能带来的好处都是一样的：原理简单，工作高效。我们从附近的建筑工地借来了搭脚手架的材料，又在学校各处搜刮能充作吊兜的材料，我追着卡文迪许实验室（Cavendish Laboratory）的技术员弄来了一根5米长的金属臂，然后我们把这些全都堆在学校操场上，打算大干一场。在那之前的8年里，剑桥大学丘吉尔学院（Churchill College, University of Cambridge）一直是我的家，学院工作人员早已习惯了我和我那些不知道从哪儿冒出来的奇怪装置。无论我的奇思妙想有多离谱，路过的同学总是表现出极大的友善和宽容。想起这些往事，我仍在惊讶中心怀感激。这就是学校的氛围。那个星期，操场对面有另一群人正在尝试用平流层气球把一只泰迪熊送上太空。

投石车的基本结构并不复杂。我们需要建造一个框架，框架内要有一个离地两三米的支点，然后得在支点上架一根长梁，就像一个巨大的跷跷板。接下来，我们调整支点的位置，让支点两头的臂长达到一个相当悬殊的比例。现在，我们得到了一个A字形的支架，上面架着一根超长的棍子，棍子较长的那端垂至地面。较短的那头用来放重物，较长的那头用来放“炮弹”。我们首次组装完毕的那天阳光明媚，真是个完美的发射日。

然后我们遇到了一个问题。投石车是件美妙的器械（当然，被攻打的一方会有不同意见），它巧妙地利用了重力。你可以在跷跷板的短臂那头放一件重物，只要一松手，短臂就会立即快速下沉。整道梁绕着支点划出一道圆弧，长臂连接的吊兜随之转动。在这一系列快速转动的过程中，吊兜里的“炮弹”也会以支点为圆心旋转，因为吊兜为它提供了向心力。本来一切都很好，但我们却没能找到足以撬动整个结构的配重。我建议用我的身体来做配重，然而我的体重太轻，完全压不住我们的跷跷板。我们束手无策。那天晚上，我跟另一帮朋友倒了一大通苦水，并严肃地拒绝了他们叫我多吃点蛋糕的建议。然后，一位朋友提出，我们可以试试他的水肺潜水设备。于是第二天，我绑着10千克的潜水设备带又试了一次。这次一切都很完美。我拖着跷跷板的一端向下坠落，另一头的吊兜高高翘起，整套装置都转了起来。接下来该准备下一步了。

吊兜仅由一个小绳圈固定，整个计划的关键点在于，当吊兜运动到

最高点的时候，绳圈脱落，吊兜松开。这意味着“炮弹”承受的向心力瞬间消失，于是它无法继续转动。现在条件变了。在这一刻，吊兜内的“炮弹”已经拥有极快的速度。向心力消失的瞬间，它会立即以这一刻的方向和速度做直线运动。它不会继续旋转，而是沿着切线飞行。这就是投石车的原理。

我们在吊兜里放了双鞋，一切都已准备就绪。我背朝操场拽着跷跷板跳了下去，杠杆另一头向上转动，吊兜开始上升，很快越过了支点。吊兜松脱的时间非常完美，我们的第一次发射成功了！那双鞋越过我的头顶飞向操场中央。我不愿意用石头来做实验，鞋子已经完美地验证了计划的可行性。最起码我们的装置能够投出去一双长靴，在极其有限的时间里，我们也只能做到这步了。练习了几次以后，我们满意地拆开装置，把所有零件送到了第二天的比赛场地上。

多塞特蒸汽机节刚刚开幕，我们膨胀的自信就遭到了极大的打击。其他几个中年男人组成的团队都带来了他们在车库里花费数月打造的设备，这些作品结构精巧、装饰华美。而我们在几天内用脚手架零件和废旧地毯拼凑的装置灰头土脸，一看就不讨喜。但我们依然勇敢地把它组装了起来。几名大赛工作人员（也都是些中年男人）过来看了看。“用人来做配重感觉很蠢，”其中一个人说，“你们应该模仿中世纪的战士，用绳子把杠杆拉下去，那样就好多了。”我辩解采用外部配重正是投石机能获得成功的关键所在，但他们谁也没听进去。实际上，投石机直到11世纪才开始成为强大的攻城机械，这恰恰是因为在那之前，大家一直试图用人力来拉动杠杆。但这几名工作人员只管把手揣在兜里，想当然地断言用绳子拉肯定强得多，暗示我们这些空有热情却缺乏经验的女人应该对他们好心提供的帮助感恩戴德。直到我的搭档终于放弃，被迫附和了他们的意见，这几个人才心满意足地走了。我们没时间争吵，比赛快要开始了。

他们在距离投石器大约25米处画了一条线，第一项挑战是在2分钟内将尽可能多的长靴扔过线，夺得前五名的团队将进入比赛的下一步，比试谁的装置投掷的距离最远。计时开始了。我们一起拽动跷跷板上的绳子，吊兜开始向上运动，但第一双靴子几乎直接砸在了我们头上。我们压下跷跷板的速度不够快，吊兜无法获得足够的转速。我们又试了一

两次，大约1分钟后，我告诉两位搭档，这个法子行不通，于是我们决定回归最初的想法。我系上潜水设备，跳下充作跳台的文件柜，跷跷板一头猛地向下一沉，另一头的长靴终于呼啸着飞过我的头顶，越过了目标线。再来！装填长靴，爬上文件柜，跳下去，呼！再来——裁判的哨子响了，时间到。

我们扔过线的靴子只有两双，实在太少，所以没能进入第二阶段。中年男人充满同情地安抚了我们，祝福我们下次好运。我避开了那个建议我们使用绳子的人，因为我简直怒不可遏。我们的办法有效！我们用脚手架、地毯和简洁优美的物理学搭建的设备非常有效，完全符合我的预期。我们本来有机会打败那些结构复杂、外表华美的车库美人儿！但临时更改方案彻底打乱了我们的阵脚。[67]其他大部分竞争者的方法都没有我们这么高效。他们的装备或许看起来很漂亮，但我们的投石机在物理层面上更精良。

虽然我亲手打造的投石机效果不尽如人意，但在800年前，正是这种简单的装置改变了战场的面貌。攻城方能以极高的精度投掷沉重的石块，这意味着你可以重复攻击城墙上的同一个点，直到城墙倒塌。经过约两个世纪的发展，投石机变得越来越大，性能越来越棒，人们甚至给它起了“投石神器”（God’s stone thrower）以及“战狼”（Warwolf）之类的绰号。建造一台投石机需要消耗大量木材，但它每隔几分钟就能将一块150千克的石头扔到敌人头上，相当物有所值。让石块在吊兜里绕轴旋转，你可以在极短的时间内获得极高的速度。当然，石头一直旋转就没什么用了，这只是加速的手段。一旦石块达到足够的速度，你就会趁它转动到合适的方向时收回向心力。石块呼啸着向外飞出，方向和你预计的一模一样。在稳定的火药让大炮成为真正的利器而非定时炸弹之前，投石车一直是最强大的攻城器械。



旋转的东西有很多。此时此刻，你和我都在旋转。我们每天都会绕着地轴旋转一圈，但你不会有任何感觉，因为地球实在太大，我们转动的速度十分缓慢。如果你站在赤道上，那么你横向运动的速度大约是1670千米/小时。我是在伦敦写完这一章的，本地的横向速度大约是

1050千米/小时，因为伦敦离地球的转轴更近。我们都生活在一个旋转的巨大星球上，而且旋转物体表面的其他物体很容易被甩出去，那么我们为什么还好端端地站在地面上？因为地球对我们的吸引力足够强大。事实上，哪怕你不在地面，而是在人造卫星的轨道上，地球也不会让你甩出去。而火箭在升空时，还可以借助地球的旋转获得更高的速度。

1957年10月4日，一颗名叫“伴侣号”（Sputnik，也译作“斯普特尼克号”）的金属小球发出了太空时代的第一声啁啾，整个世界都在屏息倾听它的声音。作为第一颗进入轨道的人造卫星，“伴侣号”是个了不起的技术奇迹。它每隔96分钟就会绕地球转一圈，所过之处，地面上的短波无线电设备都能收到清晰的“嘀嘀”声。那天清晨，美国人醒来的时候还满怀自信，觉得自己的国家是地球上最了不起的国家；但在太阳落山之前，“伴侣号”顺利入轨的消息就已动摇了他们的信心。短短一年内，苏联又发射了一颗人造卫星，这颗卫星个头更大，而且搭载了一只名叫“莱卡”（Laika）的小狗。深受震撼的美国人还没来得及发射任何东西，但他们已经开始建设NASA，也就是著名的美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration）。太空竞赛正式开始。

“伴侣号”真正了不起的地方不是飞上了天。要知道，地球这样的行星是很庞大的，小个子的物体靠近它都会被引力拽到地面上。要把卫星送入轨道，首先你得让它飞上天，但真正的难点在于把它留在天上。“伴侣号”没有摆脱地球的重力，但这不是问题的重点。道格拉斯·亚当斯在谈及飞行（不是太空轨道飞行）时曾经精准地概括出了窍门：“诀窍就是，你得学会不断瞄准地面降落，但永远都落不下来。”“伴侣号”一直在向着地球下落，只是它永远不会着陆。

“伴侣号”是在哈萨克斯坦的沙漠地区发射的，那里建起了一座规模宏大的宇航发射中心——拜科努尔航天发射场（Baikonur Cosmodrome）。火箭搭载着“伴侣号”向上穿过厚重的大气层，然后转为顺着地球的弧度加速飞行。最后一节火箭脱落时，“伴侣号”绕地球公转的速度已经达到了大约8.1千米/秒。这就是绕轨飞行的秘密所在，难点在于水平加速，而不是向上飞行。

这颗小金属球根本没有摆脱地球重力。事实上，要停留在绕地轨道

上，它离不开重力的帮助。否则，这颗卫星很可能继续向前运动，头也不回地跑到宇宙深处。在轨道上运行时，“伴侣号”承受的重力大小和在地面时差不多。[68]但是，这颗卫星拥有极高的水平速度。在一段时间内，它的高度虽然下降了一些，但它同时也会向前运动一段可观的距离。这段距离正好契合地表的弧度。因此，“伴侣号”一直在下落，地球也一直在弯曲，二者最终达到轨道飞行的美妙平衡。一定的水平速度把卫星留在了天上。由于太空中几乎没有空气阻力，所以它完全可以永不停歇地围着地球转圈，不断下滑，但永不坠落。

进入轨道的卫星必须拥有足够的水平速度，才能达到上述平衡。由于地球自身的运动情况，哈萨克斯坦的基地本身就已拥有一定的速度。离地轴的距离越远，这个速度就越快。从赤道附近发射的飞行器会获得较高的起始速度。进入近地轨道需要8千米/秒左右的水平速度，哈萨克斯坦基地可以天然给予的速度大约是400米/秒。如果向东发射，算上地球自转带来的影响，哈萨克斯坦发射的飞行器其实已经拥有了5%的初始速度。如果是在北极点附近发射，就没有这个好处了。

旋转烘干机的甩干桶会拦住衣服，不让衣服甩出去；而在自行车馆里，向内的压力来自倾斜的赛道。作为人类太空探险的丰碑，“伴侣号”受到的向心力是由重力提供的。旋转物体需要向心力才能保持运动状态不变。甩干桶里的衣服和“伴侣号”遵循着同样的规律：如果向心力突然消失，它们必然会保持前一刻的速度和方向，继续做匀速直线运动。

因此，哪怕是在我们头顶几百千米的高空中，重力依然非常重要。但同样不容忽视的是，太空生活的一大乐趣就是失重。宇航员在零重力环境中飘来飘去，为了不打翻东西和自己较劲，而所有物品都在到处乱飞。既然重力的影响在大气层外依然有效，又为什么会出现这样的情况呢？此时此刻，国际空间站就在我们头顶的轨道上飞行。生活在这个巨型科学设施里的宇航员骄傲地宣称自己担负着特殊的使命，但我一点也不嫉妒他们。其实他们只是在连续下落而已，和“伴侣号”一样。只不过这么说听上去不怎么酷而已。

在自由落体状态下，你不会感觉到重力的存在，因为你的脚下没有支撑力。宇航员的情况就是这样，他们没有感受到支撑力，所以也没有

重力在身的那种踏实感觉。就像电梯刚刚开始下降的那个瞬间，你会觉得自己变轻了一点，因为地板提供的支撑力比刚才小了那么一点。如果电梯井够长，电梯下降的速度够快，你也会体验到失重的感觉。轨道上的物体无法摆脱重力，却可以忽视重力的存在。不过，就算你感觉不到，它依然存在，正是重力为你提供了绕地公转的向心力。

掉落的面包和旋转游戏

旋转能为我们带来很多好处，但有时候它也会惹麻烦。举个例子：面包片落地时，总是涂黄油的那面朝下。你从烤面包机里取出一片热乎乎的面包片，涂上一层黄油。黄油开始融化，散发出美妙的香气，然而就在你伸手去拿茶杯的时候，一个不小心，面包片滑向了桌子边缘。它在桌子边上磕了一下，等你回过神来，它已经躺在地上了，涂了黄油的那面正好朝下。香喷喷的黄油现在成了地板上恶心的一摊垃圾，打扫固然是个麻烦，更让人心情低落的是，你会感觉整个宇宙都在跟自己作对。为什么事情总是往最坏的方向发展？面包片为什么总是这样翻转？

这样的现象的确存在。很多人做过实验，他们一次又一次把面包片从桌子边缘推下去，结果发现，涂黄油那面朝下的次数远远多于另一面。面包片落地时到底哪一面朝下，这和坠落开始时的状态有一点关系；但整体来说，这背后还有更强大的规律，我们对此束手无策。而且这种现象和黄油带来的额外重量无关。大部分黄油会渗入面包片内部，就算没有，它增加的重量也极其有限。

请思考这个问题：面包片落地时为什么会翻滚？这个过程发生得很快，你很难看清（另外，要知道，要是你一直紧盯着面包片，那它就没那么容易掉下去了）。你可以故意牺牲一片面包，以便仔细观察这个过程。[69]你甚至可以拿一本大小差不多的书来代替面包片。请把试验品平放在桌子边缘，然后轻轻把它推向“悬崖”。就在面包片一半悬空的刹那，两件事情发生了。首先，面包片开始像跷跷板一样向下倾斜；其次，就算此时你停止推动，它也会自己滑向桌子外边。现在，一切都看面包片自己了——滑动，旋转，啪嗒。

在面包片一半悬空以后，它就离开始旋转不远了。关键在于，从某

一刻开始，面包片悬空的部分会大于留在桌面上的部分。重力将整片面包向下拉，桌子能提供向上的支撑力，但空气不能。就像跷跷板一样，重点在于平衡。面包片移动到中间的瞬间，留在桌上的那一半承受的支撑力正好等于悬空那一半承受的重力。这个中点位置叫作面包片的“质心”，也就是说，如果把支点放在这里，跷跷板两头就能达到完美的平衡。

等你意识到面包片正在坠落，一切都已经来不及了。一旦它滑出桌子边缘，你甚至可以算出它坠落所需的时间。如果桌子高约75厘米，那么面包片只需要不到半秒的时间就会落地。一开始，面包片因翻转而坠落，接下来它会在空中不断翻转。[70]在这里，起到关键作用的力是面包片的重力。估算一下面包片的重力，我们可以大致算出，它会在0.4秒内旋转180度。既然初始状态下涂黄油的这面朝上，那么落地时这面必然朝下。每次实验都遵循同样的规则，所以最后的结果几乎也完全相同。面包片落地时朝下的总是涂黄油的一面。

要想改变结果，你只有一个疯狂的选择[71]：在面包片即将开始翻转的瞬间，把它猛地向外一扫。显然，面包片会飞出去，但它在桌子边缘进行翻转的时间很短，所以它旋转的速度会减缓。这样一来，在落地的时候，涂黄油那面可能还来不及翻到下边。也许，它会划过一道漂亮的弧线，落地时涂黄油的那面朝上。当然，它也有可能掉进沙发下面，或者糊到宠物狗身上。

面包片之所以会旋转，是因为它具备了两个要素：旋转的轴和推动它绕轴旋转的力。面包片的重力方向始终向下，无法推动它转动完整的一圈，但这根本不重要。重要的是，这个力的大小足以让面包片开始运动，并且它推动面包片绕支点转动了至少一点点距离。如果没有外界的阻挠，这样的旋转一旦开始就会自发进行下去。

我们在《序章》中提到的旋转鸡蛋也遵循同样的定律。想一想自由旋转的常见物品——飞盘、扔到空中的硬币、橄榄球、旋转陀螺——你会发现，它们会一直保持转动。如果你向空中扔一枚硬币，它打着转向上飞，然而在你接住硬币之前它就自己停止了转动，你一定会觉得非常怪异。[72]任何旋转的物体都拥有角动量，这是衡量物体转动状态的量

度。除非有外力（例如摩擦力或空气阻力）拖慢了它的转速，否则物体必将永远保持原来的旋转状态，这就是角动量守恒定律：在没有外力干扰的情况下，转动的物体必将保持转动。

转圈圈是一种不需要玩具的童年游戏。你随时都可以用原地转圈的方式赶走无聊。小伙伴们可以比一比谁转得更久，转完了以后大家都会东倒西歪，十分有趣。旋转很好玩，而且不会带来太多问题，你会在短时间内感觉头昏脑涨，这对健康影响不大。可惜成年人玩这种游戏会难为情，不然，我们对自己的了解或许还会更深一些。转动之所以会让你迷失方向，不是因为你的脑子真的迷糊了，而是因为你的耳朵里会发生一些奇妙的变化。

请回忆一下《序章》里提过的生鸡蛋和熟鸡蛋。先把两种带壳鸡蛋横放在桌子上旋转，几秒钟后，请用手指快速按住蛋壳，两枚鸡蛋都会停止转动，但是当你挪开手指，其中一枚鸡蛋会继续旋转。熟鸡蛋的内部是固体，蛋壳和壳里的东西形成了一个整体，所以当你按住蛋壳的时候，它会彻底停转。但生鸡蛋内部是液体，蛋壳和里面的东西各自独立，所以停止转动的只是蛋壳，内部的液体仍在继续转动，它没有理由停止。等你松开手指，生鸡蛋里面的液体就会带动蛋壳再次旋转。

你自己原地转圈的时候，你的大部分身体会像煮熟的鸡蛋一样作为一个整体一起运动。当你停止转动时，你的脑部、鼻子和耳朵都会同时停转，但你的耳朵里有一个小例外。人的耳朵里有一种半圆形的小管子，里面充满了液体，它们的表现和生鸡蛋相似。液体和容器的运动不一定是同步的，因为二者不是一个整体。耳朵里的纤毛会探测到这些液体的动态，然后大脑再将液体的运动与眼睛看到的景象比对，这是人体感知自身位置的方式。

你转头的时候，耳朵中的这种液体不会立即跟着转动，它的运动有一定的延迟。如果你持续旋转一段时间，这些液体当然也会追上身体的步调，和它的容器一起进入稳定的旋转状态。等到你突然停下来的时候，这些液体并不会立即停转。就像生鸡蛋一样，虽然蛋壳停止了转动，但里面的液体还在继续旋转。你的耳朵在告诉大脑，“我正在转动”，但眼睛传给大脑的信息是，“我已经停下来了”。大脑也被弄糊涂

了，所以你才会感觉头晕目眩。接下来，耳朵里的液体也会慢慢停止转动，头晕的感觉随之消失。

当然，这种原因造成的头晕也有办法消除，芭蕾舞者在旋转时就掌握了这样的小技巧。他们不会让头和身体从始至终完全保持一致，而是会让头部有所停顿。在这个快速启停的过程中，耳朵里的液体来不及进入稳定的旋转状态，所以芭蕾舞者停止旋转后不会觉得头晕。

角动量守恒中的“守恒”至少有两个方面的含义。第一，没有转动的物体会一直静止，如果没有外力，它不可能自己转起来。第二，物体一旦开始旋转就将一直保持旋转状态，除非遭到外力的干扰和阻挠。在我们的日常生活中，减缓物体转速的力通常是摩擦力，所以陀螺和空中翻转的硬币都会越转越慢。在没有摩擦力的理想情况下，物体真的会一直保持旋转，所以地球上才会有四季。

四季更迭和飞轮储能

英格兰北部的四季为我留下了一段段鲜明的记忆。炎热的夏日，我常常沿着运河远足。细雨绵绵的秋天是观看曲棍球比赛的好时节。寒冷刺骨的冬天，我们吃完丰盛的波兰式圣诞大餐，然后开着车回家。春天的白昼一天天变长，让人期待。分明的四季为生活增添了许多乐趣。在加利福尼亚州居住的时候，最让我不习惯的是这里模糊的四季。我感觉时间凝固了，只剩下强烈的不安。时至今日，我对季节依然十分敏感。我热爱季节的循环，喜欢体验每个季节独有的事物。别看我们生活在现代，四季依然会带给我们不同的动物、不同的空气、不同的植物乃至不同的天空。而这些丰富的细节之所以存在，正是因为物体一旦开始旋转就不会停止。

旋转是有方向的，每个旋转的物体都有一条转轴。我们可以想象地球的转轴是连通南北极的一条直线，仿佛它会微微凸出地表，指向深邃的太空。这里要注意的是，地球曾遭受太阳系内很多小型天体的撞击，人们甚至怀疑曾有行星撞击地球，产生了月亮。因此，地球自转的转轴并不完全垂直于地球公转太阳所构成的平面。

如果站在高处俯瞰太阳系，那么你会看到太阳位于中央，所有行星绕太阳旋转，其中地球的自转轴微微倾斜。地球这样的转动状态必然一直持续下去。从地球的角度观察，地球位于太阳的某一侧时，转轴的北极指向远离太阳的方向。等到6个月后，地球运行到太阳的另一侧，转轴北极指向了太阳。在地球绕太阳公转的过程中，它的自转轴不会改变方向，因为没有外力作用，所以它必将保持原来的状态。但是，这也意味着随着地球的公转，各个地区得到的日照量必然有所变化。这就是四季的来源。[73]地球上之所以会有昼夜变换，是因为地球不断自转，季节循环则与倾斜的自转轴有关。[74]

旋转影响着我们生活的方方面面。有一种以旋转为核心的设备可能在未来成为主流，它的名字叫作“飞轮”。任何旋转的物体都具有一定的能量，而保持旋转则意味着物体可以借此储存能量。如果你能设法在物体转速变慢时回收能量，那么你就掌握了一种能量源。这就是飞轮的工作原理。其实这种设备并不新鲜，早在几个世纪前，它就已经诞生。但是，新一轮的飞轮热潮即将到来，这种高效的现代设备将帮助我们解决很多棘手的问题。

应对不同时间段的不同需求是电网面临的最大挑战。举个例子，大家做晚饭的时间段相差无几，所以全国的供电需求会在同一个小时内飙升，随后出现回落。在理想情况下，监控系统将按需调配能源，让流入网络的电能完美地契合需求。但问题在于，如果电能来自本地烧煤的火电站，那么机组无论是启动还是关闭都需要好几个小时，而你能控制的因素其实并不多。新能源又有别的问题，比如无法控制发电时间。以太阳能为例，有太阳的时候你倒是可以轻松发电，可是没有太阳又需要电的时候又该怎么办呢？

你或许会说，搞个电池把能量储存起来，等到需要的时候再拿出来用就行了。但电池并不能完美地解决问题。电池的制造成本高昂，常常需要用到稀有金属，而且每只电池都有充放电的次数限制，除此以外，电池也不能在极短的时间内放出巨大的能量。

为了真正解决问题，经过多年的研发，业界出现了一些飞轮的原型机。这种技术已经崭露头角，值得期待。飞轮实际上是一个沉重的转盘

或转筒，轴承的摩擦力极小。飞轮一旦开始转动，就会保持旋转状态。旋转必然携带能量，飞轮正是以这种方式储能的。人们可以利用电网中多余的能源驱动飞轮旋转，让它储存能量。需要能量的时候，把飞轮旋转所承载的能量转化为电能就行了。飞轮的充放电次数没有限制，充放电速度也非常快，整个过程中能量的损耗率只有10%左右，系统维护也不麻烦。

更棒的是，你可以根据自己的需求来制造不同的飞轮。家里的太阳能板只需要配个小飞轮，要调节整个电网，那就得准备一大批巨型飞轮。我们甚至可以尝试在混合动力公共汽车上安装小型便携式飞轮，公共汽车刹车时，能量可以储存在飞轮里，当它需要加速的时候，又可以拿出存储的能量。飞轮的实用性基于一条简洁优雅的原理：角动量守恒定律。鸡蛋、陀螺和旋转的茶水都遵循同样的物理定律，不过，高效的现代科技才能将原理转化为实用的解决方案。飞轮的实际应用才刚刚起步，在未来，你或许会看到这种新技术日渐普及。

第8章

异性相吸

- 电与磁 -

磁的魔法

“自动给东西分类的口袋”听起来是个只能在梦里出现的东西，但这种东西其实是存在的。2015年，我在伦敦科学博物馆买了几个可爱的球形磁铁，有的带给了朋友，有的留给了自己——有科学玩具就该多多分享，不是吗？随后我买了杯热巧克力，玩了几分钟新玩具，然后把这几个小球塞进旅行袋里的几件连帽衫中间，继续赶路。

两天以后，我在康沃尔郡想起了那几个磁铁小球，我已经冷落它们很久了。我在旅行袋里翻了翻，发现它们粘成一团掉到了最底下，上面紧紧吸附着7枚硬币、2个回形针和1颗金属纽扣。袋子里的小块金属就这样得到了整理，这一点让我十分开心。不过接下来我又发现，旅行袋底下还有好些散落的硬币没被磁铁吸住。于是，我开始研究到底是哪些硬币会被磁铁吸引、哪些不会。面值10便士的硬币有几枚粘在磁铁上，另外几枚却没有。磁铁吸附的硬币全都是面值20便士以下的，其中最多的是1便士的和2便士的，而且制造日期都在1992年以后。

磁铁其实很挑剔，它们认为大多数材料不值得去吸引，比如塑料、陶瓷、水、木头或者活物。但是铁、镍和钴就大不相同了，只要没有外力的束缚，磁铁一定会飞一般地扑过去。我猜，我们之所以这么熟悉磁力，完全是因为铁很常见。这种元素占据了地球质量的35%，而钢（它的主要成分是铁，此外还有少量其他物质）则是现代社会用于修建公共设施的基础材料之一。如果冰箱门不是钢铁制成的，那么冰箱贴根本不会出现。钢铁无处不在，所以磁力也成了日常生活中最常见的一种力。

旅行袋里的磁铁根据硬币的材质对它们进行了分类。现在，1便士和2便士的硬币都是钢制的，只是表面镀了一层薄薄的铜。而在1992年

以前，这两款硬币的铜含量高达97%。新旧两种硬币在我看来几乎毫无区别，但磁铁能够看穿它们的本质。[75]20便士的银色硬币不会被磁铁吸引，因为它其实是铜制的。老版的10便士硬币也是铜制的，但是从2012年起，10便士硬币就改成了镀镍的钢币。被磁铁吸引的所有硬币主要成分都是铁，尽管其中有些看起来更像是铜币。

磁铁会在周围生成一个磁场，这可以说是一种“力场”。换句话说，在这个场的范围内，磁铁会对其他物体产生推力或拉力，哪怕二者并未发生接触。这听起来似乎有些奇怪，但自然规律确实如此。磁场看不见也摸不着，所以我们很难想象这是个怎样的存在。磁铁还有个最重要的特性：所有磁铁都拥有两极，即N极和S极。

任意磁铁的N极必将吸引另一块磁铁的S极，但两块磁铁的N极会互相排斥。起初我包里的硬币没有磁性，但磁铁耍了个花招，把它们都吸引过去。被吸引的硬币内部有许许多多个小区域，我们称之为“磁畴”。每个磁畴内都有一个小磁场，但它们的N极各自指向不同的方向，这些小磁场会相互抵消。硬币靠近磁铁时，磁铁产生的磁场立马对这些磁畴施加影响，让这些小磁场发生变化。变化的结果是，硬币里的S极纷纷避开磁铁的S极，靠近磁铁的N极。硬币里的N极纷纷避开磁铁的N极，靠近磁铁的S极。于是，硬币整体也有了明确的S极和N极，正好和磁铁的两极异性相吸。一旦我把硬币从磁铁上抠下来，硬币内部的磁畴又会恢复原来的状态。

人类早已学会通过各种方式利用奇妙的磁力。往小处说，我们制造了冰箱贴，往大处说，磁铁关系到发电技术的成败，因为发电设备的核心部件都有磁铁。发电当然不能单靠磁铁完成，但磁和电的关系密不可分，在现代社会中，这是一条基本的常识，基本到了我们经常对它视而不见的地步。

科幻作家阿瑟·C.克拉克曾经说过：“足够先进的科技看起来与魔法无异。”电和磁共同造就了无数魔法般的高科技。在物理学的世界里，这两种看不见的力常常同时出现，所以我们也总是把它们放在一起讨论。电和磁相互影响，密不可分。在探讨二者的关系之前，我们不妨深入了解一下我们更熟悉的电。糟糕的是，大部分人对电的初体验来得十分直

接，而且常常伴随着疼痛。

静电和蜜蜂

罗得岛州是美国东北部一个民风淳朴的小州，我曾在那里住过两年。这个州的官方昵称是“海洋之州”。这是美国最小的州，这昵称听上去却无比广阔。当地人倒是不在意这一点，他们只在乎两件事：海岸线和夏天。出海之帆、捕蟹小屋、海螺沙拉[76]、美丽海滩，这些构成了罗得岛生活的主旋律。但那里的冬天十分寒冷。游客全都消失了，当地人也缩回了屋里，如果我出门时关掉了暖气，回来后准会发现连厨房里的橄榄油都冻住了。

冬日最美的时刻，是醒来时感觉到纯粹的寂静，不用睁开眼睛就知道昨晚下了雪的时刻。我在晦暗潮湿的曼彻斯特长大，下雪总是令我激动不已。我爱雪，雪花永远不会让我厌倦。我穿上温暖的冬靴，铲尽小路上的白雪，雪地里掘洞的松鼠引得我放声大笑。在雪天特有的寂静之中，我一步一顿地走向自己的车。在下雪的清晨，当我第一次触摸到车身时，迎接我的总是强烈而令人疼痛的静电。我总是不长记性。天哪！

有时候我会埋怨汽车，但仔细想想就知道，这样很没道理。沿着小路走向汽车时，我身上携带着一群想找出路的偷渡客，静电和疼痛只是它们“跳船”产生的作用。这些“乘客”就是很小很小的电子，它们是组成物质世界的一种微粒。电子的奇妙之处在于，要感知它们的流动，你既不需要高科技和粒子加速器，也不必设计精密的实验。只要条件合适，我们的身体就能直接感受到电子的运动。不过糟糕的是，对于人体来说，电的流淌通常伴随着疼痛。

我们不妨从原子的结构说起。每个原子中央都有一个沉重的原子核，它占据了原子的大部分重量。我们能看到的所有东西基本都由质子、电子和中子三种“积木”组成，它们的电性各不相同。带正电荷的质子质量和体积都远大于电子，中子的大小和质子差不多，但它不带电。相对于质子和中子来说，电子的体形非常小，但一个电子携带的负电荷可以平衡一个质子携带的正电荷。这几种积木组成了物质世界的基本结构。质子和中子在原子中央聚集成团，形成沉重的原子核。在电荷问题

上，原子是需要平衡的。正电荷和负电荷就像磁铁的N极和S极一样，排斥同类，吸引异类。于是，小小的电子聚集在了沉重的原子核周围，因为它们带有负电荷，会被带正电荷的原子核吸引。整体来说，原子内部的正负电荷相互抵消，但电荷产生的引力将原子凝聚成了一个整体。我们看到的所有物质都充满了电子，但由于电性总是平衡的，所以我们根本不会意识到这些电子的存在。只有当它们动起来的时候，我们才会注意到这些小东西。[77]

问题在于，电荷的平衡不等于一成不变。两种不同的材料接触时，电子常常会在二者之间流动。这样的流动时时刻刻都在发生，但它通常无关紧要，因为一般而言，多余的电子很快就会回到自己应该待的地方。我穿着袜子在屋里走来走去，这不会造成任何问题——每走出一步，尼龙地毯上的一部分电子都会跑到我的脚上，但它们很快又会自己回去。不过，要是我穿上了羊毛衬里的胶底靴子，情况就不一样了。电子还是会流窜到橡胶靴底上，但它们再怎么敏捷也无法轻松穿透橡胶，因为这是一种绝缘材料。橡胶自身拥有足够的电子，但它很难吸收多余的电子。

我清理了早餐桌，穿好了外套，整理好手袋准备出门。在这个过程中，越来越多的电子通过皮肤和织物的接触聚集到了我的身上。这些多余的电子分布在我身体的表面，等我跨出门的时候，我身上已经多了几千万亿个电子，这个数字听起来大得惊人，但和我自己原本拥有的电子总量相比，这其实少得可怜。

电子为什么没有逃走？每个多余的电子都会遭到同类的排斥，只要有一条出路，它们铁定会一去不回。但我的靴子挡住了电子逃向地面的路径。它们还有另一条常见的出路：潮湿的空气。湿漉漉的空气中含有大量水分子，水分子具有极性，能吸引多余的电子。大部分情况下，我身上多余的电子会搭乘空气中的水分子迅速逃离，但在大雪之后，空气总会变得异常干燥。没有了丰沛的水分子，电子自然无路可逃。

在干燥的雪天，我沿着房前的小路走向汽车，完全不知道自己身上还搭载着那么多携带负电荷的乘客。停在地上的车就像一个有待存放大量电子的仓库。就在我赤裸的手指接触车身金属的那个瞬间，逃生通道

轰然打开。金属是电的良导体，所以电子可以轻而易举地在金属中流动。我身上的电子乘客们争先恐后地透过指尖的皮肤拥向外面，它们终于获得了自由。在电流的直接刺激下，皮肤内的传感器产生尖锐的疼痛信号。于是我疼得咒骂起来，暂时忘记了雪有多迷人。

静电恐怕是大多数普通人对电最直接的体验。电是无处不在的。建筑物墙壁、电子设备、汽车、灯、钟和风扇里都有电流，但电的概念绝不仅限于插头、导线、回路和保险丝，这些东西不过是人类驯服电流之后制造的粗糙产品。在我们这颗星球上，电存在于你意想不到的很多地方，比如，一只小小的蜜蜂身上。

想象一个温暖、平静而慵懒的日子，你坐在一座英式风格浓郁的花园里，草坪边缘的燕雀有一搭没一搭地啄着虫子。在它身后，一排排生机勃勃的鲜花正在争夺水、营养、阳光和授粉者的注意力，这场战争缓慢却激烈。茉莉花和香豌豆的气息飘过草坪，炫耀着它们的美味。一只蜜蜂在花圃中飞舞，寻找着目标。这幅画面似乎相当闲适，然而对蜜蜂来说，这是一份艰苦的工作，效率十分重要。

要停留在空中，蜜蜂需要付出极大的努力——每秒振翅200次。我们听到的嗡嗡声就来自它小小的翅膀划过空气时产生的振动。对于蜜蜂这么小的生物来说，空气阻力会带来不容忽视的影响，推开大量空气分子绝非易事。使劲拍打空气，这样的飞行方式听起来似乎不够优雅，但非常实用。蜜蜂在一朵粉色矮牵牛花旁边盘旋片刻，决定停下来歇歇。就在蜜蜂即将钻进花蕊却还没有接触到花朵的那个瞬间，奇怪的事情发生了：原本好好待在花朵中央的花粉突然跳了起来，扑向蜜蜂脚上的绒毛。蜜蜂停在花瓣上以后，更多花粉粘到了它身上。它还没来得及喝一口花蜜，身上就已沾满了这朵花儿的DNA，这些花粉看起来简直像是主动跳到它身上的。

我们发现，飞行增加了蜜蜂的吸引力——这不是因为它容貌美丽、举止优雅，而是因为它的身体带电，尽管电量少得可怜。就像我在雪天的经历一样，飞行的蜜蜂身上也会聚集一些额外的电荷，但这次谁也不会感到疼痛。

蜜蜂自身所带的电子在蜂翼边缘徘徊。如果有什么东西以极快的速

度从蜜蜂身边经过（例如空气里的某些分子），那么它就可能带走蜂翼边缘的电子。事情就是这样，这和常见的摩擦起电是一个道理。摩擦可以使某件物品携带的电子多于或少于合适的数量，引发不平衡的情况。蜂翼以极快的速度与空气摩擦，在这个过程中，蜂翼上的电子会被“甩掉”，进入空气之中。于是，飞翔的蜜蜂就携带了微量正电荷，因为它身上的电子数量变少了，无法平衡身上带正电的原子核。当然，蜜蜂所携带的电量非常少，它身上不会出现能被人类感知的静电现象。

蜜蜂靠近花朵时，它的身体会吸引带负电的电子，同时排斥带正电的微粒，就像磁铁的N极会吸引另一块磁铁的S极。就在它靠近花朵却还没有发生接触的瞬间，蜜蜂携带的正电对花朵表面的花粉已经产生了足够的吸引力，部分花粉离开花朵，隔空“跳”到蜜蜂身上。然后，这些花粉会吸在蜜蜂的绒毛上，就像带静电的气球会贴在墙上一样。蜜蜂带着这些花粉飞向下一朵花，完成授粉的过程。要是没有静电，花粉只有等蜜蜂降落在花朵上才有可能粘在黏糊糊的绒毛上。毫无疑问，蜂翼失去少量电子产生的正电促进了传粉。[78]

电子体积小、移动速度快，所以电荷转移时，真正发生运动的通常是电子。电子十分活跃，但我们很少意识到这一点。带负电的电子会彼此排斥，如果大量电子聚集在同一个地方，它们会互相推挤，总有电子会被挤走。不过，有两种原因可能让电子留在原地：要么是无处可去，要么是动弹不得。飞行的蜜蜂无法得到电子，只能让正电荷在身上积聚。

还有一种情况能阻断电子的流动，而且这种情况是我们可以控制的。如果蜜蜂降落在一个塑料花盆上，正电荷就无法流入花盆，也不会有电子流到蜜蜂身上。塑料并非没有电子，但这些电子都被紧紧地束缚着，与此同时，外来的电子也无法渗入。塑料既不能容纳多余的电子，也很难失去自己的电子。绝缘体就是这样。

如果蜜蜂降落在塑料花盆上，那么它仍然带正电。不过，一柄金属园艺叉就可以立即平衡蜜蜂身上的电荷，因为金属是电的良导体，电子可以轻而易举地转移到金属中去。很多金属原子会共享自己的外层电子。这些电子时时刻刻都在移动，而且不属于任何一个特定的原子，所

以它们很容易接纳或失去额外的一部分电子。

有了导体和绝缘体，我们才能建设电网、控制电能的流动。你需要将这两种材料拼成某种迷宫，迷宫中有一些路径可以让电子轻易通过，另一些路径则障碍重重。另外，你还得设法控制某些道路的关卡。一旦迷宫的基础结构建立起来，电的世界对你而言就尽在掌控了。

鸭嘴兽和海上电池

日常生活中的静电现象大多只能带来些小火花，要获得真正的力量，你得用更系统的方式移动电子。电网非常神奇，人们能让能量在这里流动，能用开关和变压器进行控制，把能量送到任何有需要的地方。电路可以让我们重新分配电能。有一点请你时刻谨记：电路是一个回路。电路必须形成闭环，这样电子才能自由流动，而不是积聚起来。一条电路的起点和终点与电源相连。电源会让电子从起点前进，并且在终点回收完成了任务的电子。电源像一部电梯，它能把乘客送到一条极高的滑梯顶端，乘客滑到地面上，然后再次搭乘电梯回到高处。下滑的过程就是释放能量的过程，回到地面的时候，乘客们的能量全都释放殆尽，需要从电源重新获得能量，然后再一次坐上滑梯。这就是电路正常运转的规则。

电子畅通无阻地沿着导线移动，那么推动它的力量到底来自哪里？导体为电子提供了可以移动的通路，但电子还需要前进的力量。

事实上，冰箱贴和带电的气球都会表现出一种神奇的特性，它们的周围会产生一个看不见的力场。力场范围内，一个物体会对附近的其他物体产生拉力或推力，但你看不到力来自哪里。这样的相似并非巧合，电场和磁场的联系在运动中更加清晰。我们先回顾一下力场的基本原理，看看在人类世界以外，动物会如何利用力场。

河床是一片幽暗的迷宫，里面布满了乱石、植物和树根。浑浊幽暗的河水在这些障碍物之间慵懒地流淌，就在水面下大约1米的地方，两根小小的触须从鹅卵石缝里探出，随着水的流动不断伸缩。如果有什么东西从附近经过，触须就会立即缩回去。这种淡水虾以食腐为生，现在

它饿得要命，但还得小心天敌。上游有一位猎手滑进了浑浊的水里，它划动两只带蹼的前足向河流中央前进，接着它闭上眼睛、关闭鼻孔、堵上耳朵，毫不犹豫地扎进了水下。这只鸭嘴兽该吃晚饭了。

如果小虾完全不动弹，那它不会有任何危险。鸭嘴兽游得很快，它在河底迷宫中穿梭时显得非常自信，但它毕竟眼不能见、耳不能听、鼻不能闻。小兽扁平的喙在淤泥中左右划动，寻找猎物。随着鸭嘴兽的逼近，正在觅食的虾感觉到了水流的变化，于是它一弹尾巴，倏地缩回砾石之中。结果，猎手转了个弯追了上来。虾弹动尾巴时需要发送生物特有的电信号来控制尾部肌肉的收缩，这个电信号会以虾的身体为中心产生一个转瞬即逝的电场。在这一刻，附近的电子都会受到微弱的影响，有所移动。这个电场只存在了几分之一秒，但这已经足够。鸭嘴兽的喙有4万个电传感器分布在上下表面，一旦发现水流和电流变化，鸭嘴兽立即就能判断出虾所在的方向和距离。小兽的喙闪电般准确地刺入河床，虾难逃厄运。

虾轻轻一动就为自己招来了灭顶之灾，因为只要它一动，就会引发电场的变化。每一个电荷都可以形成电场，电场中其他电荷都会受到力的作用，但电荷位置不同，受力情况会不一样，这是“场”的概念所关注的要点。有电信号收发就意味着有电荷移动，这当然会对周围其他电荷的受力情况产生影响。所有运动都牵涉电信号在生物体内的移动，这样的变化必然波及电场，所以只要你离猎物的距离够近，探测电信号的确是一种非常有效的捕猎方式。斑斓的伪装色也不可能掩盖电信号。任何动物都会动，哪怕是最轻微的动作也会产生电信号，从而暴露行踪。

既然如此，我们为什么感觉不到自己产生的电场？这是因为人体产生的电场相对较弱。更重要的原因是，电场在空气中衰减得很快，因为空气不导电。水（尤其是含盐的海水）是电的良导体，所以电场在水中的影响更大。几乎所有依赖于电信号探测的物种都生活在水中，蜜蜂、针鼹鼠和蟑螂是我们目前所知的为数不多的几个例外。

电路内部是有电场的，电子在场中受到力的作用，运动起来。但这个电场是从哪儿来的呢？我们不妨从电池开始说起。不同电池的形状和尺寸各异，其中有一种深得我心，那就是笨重的海洋电池，我之所以特

别在意它们，是因为在一场狂野的风暴中，这组漂在海面上的电池成了我完成某个重要实验的唯一指望。

为了在风暴中研究海上的物理学现象，我们需要去实地观测。海洋环境非常复杂，你必须在野外搜集足够的数据，才有可能在温暖舒适的办公室里提炼出理论。不过，就算坐着船乘风破浪，到了海岸几千米外，我依然很难接触到真正感兴趣的东西，也就是海面下深达几米的水体。弄明白那片区域发生的事，我们会更加了解海洋如何“呼吸”，还能完善天气预报和气候预测模型。想透彻地了解情况，我就得亲自进入风暴之中。这非常危险。我不能跳进风暴中的大海，但我的实验必须在海水中完成。实验需要能量，需要电源，与此同时，实验设备全都在船外的海面上自由漂流，载沉载浮。海上没有线电源，这些设备只能依靠电池。对我来说，幸运的是，漂在水里的电路和陆地上的一样可靠。



水手长望着地平线，蹙紧了眉头。他将双手插在沾满污渍的连帽衫衣兜里，踩着颠簸不定的甲板朝我走来。这是11月的北大西洋，我已经有四周没见过陆地了。放眼望去，目之所及，除了起伏的灰暗海水，就是同样灰蒙蒙的天空，周围的所有东西都随着风浪起伏摇摆。我把一卷绝缘胶带放在地上，一个不留神，它就沿着甲板滑了出去，撞上了水手长的靴子。在这阴郁压抑的环境中，水手长活泼地道的波士顿口音听起来简直有些不合时宜：“你还需要多长时间？”

对我来说，海上实验最辛苦的部分绝对是实验正式开始前的最终检查。我很紧张，这是我需要独自承担的责任。为了测量破碎海浪下方的泡沫，我需要一个搭载各种测量设备的巨型黄色浮筒。水手长负责把浮筒投放到船外的海域中，但我必须确保所有设备正常运转。即将到来的风暴一定非常猛烈，我极度渴望获得关于它的数据。

“马上，我把电池插上就好。”我回答。搭载设备的巨型黄色浮筒长达11米，在投入大海前需要固定在甲板上。我从浮筒最前方的防水摄像机开始检查，接下来是电源连接器。我沿着导线一路检查到沉重的电池组所在的浮筒底部，然后给摄像机插上插头。下一步，我回头去查看浮筒顶端的声学谐振器，找到它的电源，插好，检查连接是否牢固。复检

之后，我又看了看另一台摄像机。这些设备可以淋漓尽致地体现物理实验的精密和成熟，但它们首先要有电。在海上供电的是4块笨重的海用铅酸电池，每块重达40千克。自1859年问世以来，这些电池一直保持着最初的设计，但它们非常实用。

一切准备就绪，我们这些科学家裹着雨衣远远地退到甲板另一头，把剩下的活儿交给船员和起重机。巨型浮筒在船侧摇摇晃晃，最后扑通一声进入漆黑的海洋。随着最后几根绳子慢慢松脱，眼前的景象出现了奇怪的变化。原本大得像怪兽似的黄色浮筒在浩渺的洋面上显得那么渺小而脆弱，仿佛一块被抛弃的残骸，在波涛之间若隐若现。人们趴在甲板栏杆上，热烈讨论着浮筒停留在水面上的姿态和远离船体的速度。但我考虑的却不是这些问题，我一直在想的是电子。

水面之下，电子的舞蹈已经开场。它们从电池中蜂拥而出，在浮筒搭载的电路中流动，最后又回到电池的另一极。固定数量的电子在电路中循环流动，电子没有损耗，它们只会不断转圈。问题的核心在于，电子的流动需要能量来驱动，而电子又会在运动的过程中将这些能量释放出去。驱动电子运动的能量来自电池，电池是一种非常精巧的设备。

电池的巧妙之处在于，它们推动了一系列事件。这个链条中的每个节点都会为电子提供下一段路程中需要的东西。一旦将电池接入电路，电子在回路中流动的所有条件就已准备就绪。这些在海上使用的电池有两个连通外界的端子。在电池内部，每个端子各自与一对铅板中的一块相连，两块铅板不会直接接触，二者之间充满了酸液，所以这种电池被称为“铅酸电池”。电池里的铅和酸可以发生两种反应，一种充电，一种放电。充电反应完成之后，铅酸电池就准备好了足够的材料，可以进行放电的反应了。

我给实验设备接上电池，也就是接通了从第一块铅板出发，经过设备回到第二块铅板的通路。关键在于，铅板周围的化学反应会让回路内产生电场。在电场的推动下，电子离开第一块铅板，沿着通路前往第二块铅板。由于电子无法直接跨越酸液，外部的漫长回路就成了它们唯一的选择。一旦电子在电场作用下建立了流动的通路，电池内部的反应就达到了某种平衡，因为整个链条构成了闭环。通过化学反应，电子可以

从一块铅板进入酸液，最终到达另一块铅板。整套反应之所以能够循环进行，是因为这些电子可以通过外部回路再次回到第一块铅板中。最重要的是，这些电子在流动的过程中把携带的能量释放给了设备。这种能量就是电。在电子的必经之路上安插好仪器，你就可以有效地利用电能。这就是电池的工作机制，非常神奇。

我靠在甲板栏杆上望着载沉载浮的黄色浮筒，想象着电子的美妙舞步。关闭的仪器就像电路中的一座关卡，打开仪器就是打开关卡，为离开电池的电子提供一条出路。就这样，电子通过浮筒内的线路进入摄像机。在这个过程中，我们控制了电子的去向。电子总会走最便捷的路，也就是最容易导电的路，所以我们在迷宫中用导电材料搭建通路。导线是金属的，但包裹导线的塑料层是绝缘的。这是因为我们需要电流顺着导线流动，不希望电流跑到周围的其他材料中去。除此以外，这里还有最基本的控制元件：开关。电路中的开关往往连接着两段导线，二者不会始终连接在一起，但一旦开关闭合，两段导线发生接触，电子就能畅通无阻地从这条线流到那条线。要阻止电子的流动，你只需要断开开关，分开这两段导线。原本的路径被切断，电流就会停滞。

进入摄像机内部以后，电子的通路会出现分岔，流入不同的组件，但它们最终还是会汇集到一起，回到电池。古谚说，“条条大路通罗马”，我们在这里可以说，“条条大路通电池”。巨大的黄色浮筒只是电路网络的支撑设备，电子本身就会产生电场和磁场，在它们流动的过程中，相机快门会被按下，计时器会发挥作用，闪光灯会点亮，核心电路还会存储好图像和数据。

浮筒在大西洋风暴的巨浪（有时候高达8~10米）中颠簸，电子也在一刻不停地奔跑舞动。我们在颠簸的科考船上等待，忍受着自身重力变幻莫测的感觉，用魔术贴、橡皮筋和绳子固定所有物品。三四天后，电池内部的化学反应终于停了下来，它回到了最初未充电时的状态。电池里储存的能量已经耗尽，失去了动力的电子渐渐停止舞蹈。浮筒又变成了一个由金属、塑料和半导体组成的死气沉沉的壳子。但所有数据都已安全地存储在计算机的固态内存里。

几天后，风暴结束，我们找到浮筒，把它拖回船上。科考船的船员

从海里打捞东西的技术总令我赞叹不已。船只无法侧向移动，船体转向的速度也很慢，要想成功回收浮筒，船长必须把长达75米的科考船准确地开到浮筒旁边，既不能压到它，也不能隔得太远，这样船员才能用长长的钩子把浮筒拖过来。他们通常只需尝试一次就能成功。

接下来又轮到我们上场了。我们把电池插在船用电源上，让电能重新推动化学反应，为下一次投放做好准备，再把浮筒里的实验设备拆下来运回舱内。但摄像机却被留在了寒冷刺骨的舱外，因为这东西拆不下来，我手下那几位可怜的博士生得在甲板上提取数据和图像。

能量守恒定律大约是最基本的物理学定律，它的正确性在现实世界中得到了一次又一次的验证，从来没有遇到过任何反例。能量既无法被创造，也无法被毁灭，它只会从一种形式转化为另一种形式。电池拥有化学能，这些能量通过化学反应转化为电能，电能又被输送到电路中。电能所到之处，相机可以拍摄图片，计算机可以运行程序、记录数据。但这些事办成的同时，电能也被消耗掉了，或者说变成了别的能量，到了别的地方。这就是移动电子需要付出的代价。长时间运行的设备会发热，背后就有这方面原因——电能转化成了热能。电能通过有电阻的材料时必然会有部分损耗。无论走的是不是捷径，电子都需要上交这么一种“税”。[79]

摄像机装在厚厚的塑料壳里，这种材料的导热性能很差。摄像机运转时，循环流动的电子携带的能量会转化为热能。在水里，这点热其实无关紧要，因为在我们做实验的时候，海水的温度只有8℃左右，水会吸收大部分热量，让塑料壳迅速冷却下来。但空气的散热性能远远比不上水。实验室里的计算机全速下载数据的时候，摄像机将一直保持过热的状态。我们想尽了办法，唯一有效的方案是把摄像机留在舱外装满冰水的桶里（幸好船上有制冰机）。因此，我手下的博士生得在外面待上9~10小时，根据摄像机的温度打开或关闭数据下载开关，这样才能以最快的速度下载数据，同时保证摄像机不会过热烧毁。这就是野外科考的挑战。

同理，运行中的笔记本电脑、真空吸尘器和电吹风也会发热。电能必须找到一条出路，如果没有转化为其他形式的能量，它最终只能变成

热能。电吹风利用这一点来吹干我们的头发，这种小电器内部的回路能够有效地将电能转化为热能。但笔记本制造商讨厌发热，因为对笔记本而言，回路温度越高，工作效率就越低。要利用电能，我们必须支付“热税”。[80]

电子之所以会流动，是因为电场提供了动力。电池提供的不是电子，外部世界并不缺电子。电池真正提供的是驱动电子的电场。如果回路是完整的，那么电池提供的电场将推动电子循环运动。事情就这么简单。但插头上的那些数字和字体小得要命的安全警告又是什么意思？或许我们应该用英国人的方式来解决问题：找出饼干筒，把水壶放到炉子上。

热茶水和电流

茶歇必须同时具备两个最重要的元素：有茶喝，能休息。我的一些美国同事永远无法真正理解这一点，他们习惯了一边喝茶一边继续讨论工作。不过对英国人来说，“把水壶放到炉子上”代表着步调的改变。现在我正准备这样做，不过我用的是电水壶，所以我只需要灌满一壶水，然后给它插上电源。在水壶烧水的间歇，我的头脑理应享受这一小段休息时间。

按下开关是一件非常简单的事情。一小片金属移动了一点点，由此连通回路中的最后一小段。现在，水壶内部的迷宫中出现了一条通路，一条完全由导体组成的小径，可供电子轻松通过。这条小路畅通无阻，它始于插头的一个脚，经过茶壶，最后回到插头的另一个脚。在这种情况下，电场的来源不是电池，而是插座。

标准的三脚插头有一个脚位于最上方，我们称为“接地端”。它完全独立于电路的其他部分，实际上，它的作用相当于雪天的汽车——为积聚在错误位置（比如水壶的壶身上）的电子提供一条出路。但接地端不属于水壶的供能电路。

另外两个脚负责让电子动起来。其中一个脚就好像固定的正电荷，而另一个脚就好像固定的负电荷。按下开关就等于接通回路，电场也随

之出现。通路中的电子会同时感受到正电极和负电极的力。就在我翻找茶壶和茶包的时候，水壶回路中的电子动了起来。原本无序推挤的电子开始沿着导线流向同一个方向，从插头的一个脚出发，经过水壶内的回路，流动到插头的另一个脚。

水壶底部的标签告诉我，它的工作电压是230伏[81]。电压会影响推动电子的电场强度。电场越强，电子在回路中释放的能量就越多。因此，高电压意味着电路中的可用能源十分充沛。如果依然用滑梯来比喻的话，电压代表的是滑梯的高度，电子必须下降这么长的距离，才能回到插头的另一个脚。

我洗了洗茶壶，把茶包放进壶里。牛奶和马克杯都已准备就绪，现在我只要等着水烧开就好。这只需要几分钟时间，不过我口渴的时候总是很没有耐心。快点！我知道电源的电压不小，可电压不能决定一切。电压越高，电子能够释放的能量就越多，但是，回路中流动的电子数量也会影响水壶的效率。要确保壶里的水在短时间内得到大量能量，最快的办法是增加回路中的电子数量，也就是增大电流。

我们以“安培”（A）为单位测量电流。电流越大，单位时间内通过导线横截面的电子数量就越多。用整个回路的电压乘以电流，你就能算出电路在单位时间内释放的能量。我的水壶额定电压是230伏，它能够产生13安培的电流，所以$230\times13\approx3000$。壶底的标签上也是这么写的。这个水壶的额定功率是3000瓦，相当于每秒释放3000焦耳能量。这样的功率足以在2分钟内烧开一壶水，但有一部分热量会消散到周围的环境中，所以在实际生活中，烧开一壶水大约需要2分30秒。

等待茶水泡好的时候，我不由自主地想起了别人常说的一句话——电压只会震你一下，电流才会要命。在罗得岛的那个雪天，我和汽车之间的电压差可能有20000伏，但电荷的数量很少，所以这么高的电压不会对我造成太大的伤害。静电产生的电流很小，传输的能量也少得可怜。如果我捏住插头的两个脚，用自己的身体取代水壶，那就危险了。强电流由许多电子组成，每个电子都携带着等量的能量。强电流的总能量很大，因为有太多电子在回路中呼啸而过。这种情况比被汽车电一下危险得多，尽管插头两脚之间的电压差可能只有我和汽车电压差的百分

之一。对于电的杀伤力而言，电流才是关键。

在电场的推动下，电子在金属材料做的加热元件中移动，电场力会稍稍提高电子的移动速度。导体由大量原子组成，加速后的电子必然会与其他粒子发生碰撞。电子在碰撞过程中会损失能量，同时加热被碰撞的物质。因此，迫使大量电子移动意味着会发生很多很多次碰撞，由此释放大量热能。这就是电水壶的加热原理——加速电子运动，让它们碰撞其他物体，将电能变成热能。电子的运动速度其实不快，它们每秒钟可能只会移动1毫米，但这已经足够了。

把水烧开需要多少能量？单靠小小的电子移动、碰撞就能完成这个任务，想想真有些令人震惊。虽然震惊，但事实不可否认，电场推动电子在导体中运动产生的热能帮我烧好了茶。这是电能最简单的应用：直接转化为热能。不过，一旦人类学会了搭建电路、连接电源，事情就变得复杂了。

同样涉及移动电子，电池（任何电池）和插座供电大不相同。在由电池驱动的设备中，电子总是沿着同一个方向流动，这叫直流电（Direct Current，DC）。一只标准的AA电池大约能提供1.5V的直流电。连接电网的插座提供的电流则完全不同，那是交流电（Alternating Current，AC）。英国电网提供的交流电，其方向每秒钟大约会交替变化100次。[82]交流电的工作效率更高。

直流电和交流电可以互相转换，不过这样的转换有点麻烦。随身携带笔记本电源线的人对此深有体会——电源线中间总有个沉重的小方块。这个讨厌的小东西名叫“交流/直流转换器”，它的职责是把来自插座的交流电转化成笔记本电脑需要的直流电。（笔记本电脑的电池提供的也是直流电。）工程师在转换器内部设置了一系列线圈和电路。为了完成任务，转换器真的不能太小，[83]所以现在，我们还是得带着这个沉重的东西。

祖父的盒子和一段科学史

今天的人们早已对电习以为常，但在人类刚刚开始利用电能的时

候，它还是一头性情暴虐、反复无常的怪兽。我祖父就经历过各种新奇电器初次进入千家万户的年代。

最早的一批电视工程师中就有我的祖父杰克。在那个年代，电常常离不开大量的噪声和热，而且很容易引发爆炸。那些往事深深镌刻在我祖母的记忆中。在这个智能电话和无线网络触手可及的年代，祖母记忆中那些电器带来的惊恐显得非常遥远。她对电器和电路的熟悉程度也让我惊讶不已。我从没听她认真谈论过任何科学技术，但只要说起老式电视机，她总会信手拈来我闻所未闻的电气术语。“嗯，”某天她告诉我，“行输出变压器是一种重要元件，电视机里的行输出变压器有时候会发出巨响，或者一边冒烟一边飘出烧焦的味道。”祖母的话轻描淡写，但她的北方口音提醒我，那一幕真实发生时很可能极为糟糕。

我们看不见电子，但是在20世纪40年代到70年代，你不难看到电子的去向，它们经常引发砰的一声巨响，或者刺耳的嗞嗞声和噗噗声。突然出现的焦黑斑点和耀眼的闪光也会提醒你，刚才一定有大量能量去了它不该去的地方。杰克所处的年代正是电气时代的开端，也许只有他们那一代人才知道人类最初探索电的世界是怎样的体验。到了他的职业生涯末期，晶体管和计算机的结构都不再暴露在人们的视线中，小巧的外观和封装掩盖了它们复杂、精密的内在，你根本看不出它们内部的世界到底有多么宏大。不过，在这个时代到来之前的几十年里，你几乎可以亲眼见证一切奇迹的萌发过程。

1935年，16岁的杰克以学徒的身份加入了大都会维克斯公司（Metropo-litan Vickers），也就是当地人口中的“都会维克”（MetroVick）。这家电气重工业巨头的总部位于曼彻斯特附近的特拉福德，它是发电机、汽轮机等大型电气设备的世界级生产商。21岁时，杰克结束了电气工程领域的学徒期，成功出师。他的工作贡献很大，所以这位年轻人得到了免服兵役的特权。接下来的5年里，他一直在都会维克公司测试机载枪械的电子系统。这类系统的首次测试被称为“闪火”（flashing）。人们向整套系统施加2000伏的电压，只要没有发生爆炸，就算测试通过。这就是人类刚开始驯化电子的蒙昧年代。

战争结束后，EMI（Electric and Musical Industries，电子与音乐工

业公司）[84]开始招募电气专家。早期的电视机都是复杂且暴躁的野兽，只有靠专家去设置参数，反复调整，所以EMI派遣杰克去伦敦接受电视工程师的专门培训。当时电视机的主要元件包括各式各样的开关、电阻器、导线和磁铁，这些元件可以“诱拐”电子，让它们乖乖按照我们的心意行事。直到20世纪90年代，这些玻璃、陶瓷和金属制成的元件仍是电视机的核心。那种电视机可以射出一束电子，然后使之弯曲。只要操作得当，屏幕上就会出现活动的图像。

杰克学习的是CRT电视的相关技术，我喜欢这个名字，因为它总让我想起电子被发现之前的那个世界。CRT是Cathode Ray Tube（阴极射线管）的缩写，阴极射线的发现也是个有趣的故事。1867年，德国物理学家约翰·希托夫（Johann Hittorf）正在观察自己最新的实验结果。实验室里一片漆黑，这里的主角是一根两端镶嵌金属棍的真空玻璃管。这件设备听起来似乎平淡无奇，但是只要在金属棍之间接入一大块电池，就会有看不见的神秘物质从玻璃管的一端流向另一端。这是多么奇怪的事情！希托夫知道神秘物质的确存在，因为它会让安排在玻璃管另一端的特殊材料发光。谁也不知道这种流动的神秘物质到底是什么，但它需要一个名字，最后人们决定称之为“阴极射线”。阴极是指真空管与电池负极相连的那一端，神秘物质正是从这里发出的。

直到30年后，汤姆森（J.J. Thomson）才发现，真空管内流动的物质其实不是射线，而是一束带负电的粒子——如今我们称之为电子。但时过境迁，“阴极射线”这个名字已叫了太久，于是人们保留了这个约定俗成的叫法。今天我们知道，存在电压差的两极之间会形成一个电场，电子总会从负极向正极流动。任何带负电的粒子都会被电场加速，因为电场会对它施加持续的推力。电子之所以会流向正极，不仅是因为它会被正极吸引，也因为电子在运动过程中受到电场的推动。两极之间的电压差越大，电子流动的速度就越快。CRT电视内部的电子击中屏幕时的速度十分惊人。哪怕是与整个宇宙的速度上限——光速相比，这个速度也不算微不足道。

直到20年前，引领人类发现电子的阴极射线管仍是所有电视机的核心元件。每一台CRT电视背后都有一个喷出电子的设备，而显像管就是真空的，电子在这里飞行不会遇到气体的阻碍。“电子枪”射出的电子会

径直穿过真空区域，撞击屏幕。



杰克去世后，我姑妈将他车间里的一个盒子留作纪念。盒子里的小物件琳琅满目，其中有一种很像圆柱形灯泡的玻璃管，里面装着昆虫似的奇怪金属零件，这其实是一种“阈”，可以用来控制回路中的电子。在职业生涯的早期，杰克的工作是找出有问题的元件，然后把它们换掉。我的母亲、姑妈和祖母对此都有清晰的记忆，因为那时候家里到处都是五花八门的电子元件。盒子的角落里藏着一大块环形磁铁，现在它已经碎成了两半。

这个物件背后的意义非同小可，它代表了物理学家在19世纪晚期的重大发现：磁可以控制电，电也可以控制磁。电和磁是一体两面的现象，电场和磁场都能推动电子，但结果不同。电场会沿着场的方向推动电子，而磁场会对运动的电子产生侧向推力。

发出电子束已经很让人惊奇了，但老式电视机真正巧妙的地方在于对电子束方向的控制。这种技术的奥妙在于电和磁之间密不可分的关系。在磁场中，运动的电子会受到侧向的推力，磁场越强，推力也越大。通过调节老式电视机内部的磁场强度，人们可以按照需要扭转电子束的方向。姑妈给我看的那一大块永磁铁曾经被安装在电子枪旁边，它可以辅助约束电子。真正负责调整电子束方向的是离屏幕更近的电磁铁，来自天线的信号直接控制着它的磁场。磁场内的电子束逐行扫描，带着视频信号击中屏幕，让屏幕的每一点都呈现应有的明暗和色彩。祖母提到的“行输出变压器”就是用来控制电子束扫描过程的。电子束每秒对405条扫描线进行50次循环扫描，精确控制屏幕上的各个点，以保证屏幕呈现清晰的图像。

这是一场精巧复杂的电子之舞。要让电视屏幕正常显示图像，我们需要大量元件协同合作，哪个环节都不能出错。早期的电视机有很多用来调节参数的旋钮和转盘，你可能会觉得这么复杂的设备摆弄起来一定很有意思，但普通观众很难学会这么烦琐的调整方法。杰克十分擅长对付老式电视机。在那个年代，他的手法看起来简直就像变魔术。千百年来，娴熟的手艺一直是工匠的立身之本，人们可以将工匠的操作手法当

成绝活来欣赏。现在不一样了，电气工程师可以让设备正常运转，但门外汉根本看不到内行到底做了什么，更不知道设备是如何运转的。

电视屏幕上的绚丽图像竟然全都来自真空腔内沉默隐形的电子，想想真有些不可思议。长达50年的时间里，电视机的基本原理一直没有变过。让电子进入电场，它的速度必然会变化。让运动的电子进入磁场，它的路径必然会发生偏转。要是停留在磁场内的时间够长，电子甚至可以转圈。

日内瓦的欧洲核子研究组织（CERN）有一台巨型物理实验设备，叫作大型强子对撞机（Large Hadron Collider，LHC）。它最著名的功劳是在2012年发现了希格斯玻色子。[85]这台设备的运作原理和阴极射线管一模一样，只不过它加速的物质不是电子。电场能够加速任意带电粒子，磁场也能弯曲任意带电粒子的运动轨迹。这台设备里高速运行的是带正电荷的质子。通过LHC的加速，质子的速度可以无限接近光速，但即便是人类制造的超强电磁铁，也很难让质子扭转方向。于是，为了让质子达到想要的偏移程度，LHC修建了长达27千米的环形隧道。

带电粒子在真空中的流动现象让人们发现了电子，也让CERN的大型强子对撞机找到了希格斯玻色子。直到不久前，这种真空管器件还藏在千家万户最常用的电器之中。现在，笨重的CRT电视几乎已经彻底被液晶电视取代。2008年，液晶显示器在世界范围内的销量就已超过CRT显示器，历史一去不复返了。液晶显示器的普及成就了笔记本电脑和智能手机，因为它更加便携。新的显示器的背后依然是电子，但原理更加复杂。屏幕被划分为多个微小的格子，我们称为“像素”，电子开关控制着每个像素点。如果你的屏幕分辨率是1280×800像素，这意味着它实际上由大约100万个独立的像素组成，每个像素都能通过微妙的电压变化完成切换，它们的状态每秒至少要更新60次。所有像素点配合默契，令人震惊，但与笔记本电脑的功能相比，这又显得那么微不足道。

我们不妨回头来看磁铁。磁场可以推动电子，因此它也能控制电流。不过，电和磁之间的互动是双向的，电流也会产生自己的磁场。

又是烤面包机

正如我们在第5章中看到的，烤面包机可以利用红外线高效地加热面包片。但烧烤台也能高效地加热食物，这不算什么。烤面包机真正厉害的地方在于，它知道应该在什么时候停止加热。

烤面包机使用起来非常方便。只有当你压下侧面的工作杆时，面包片才会沉入烤面包机内部。如果工作杆没有按压到位，面包片就会自己弹回来。如果你把工作杆压到底，听到了咔嗒声，那么几分钟后，热腾腾的面包片就会弹出来。你不需要一直守在旁边，烤面包机会再次发出咔嗒声，然后自动把烤好的面包片弹出来。我在厨房里翻找黄油和果酱的时候，有某种力量让面包片一直停留在烤面包机内部。

烤面包机的工作机制有一种简洁之美。烤面包机内部有个托盘，托盘底部的弹簧可以将面包高高举起，远离加热元件，可是当你压下工作杆时，弹簧就会屈服于你的力量，托盘就会下沉。一旦托盘到达烤面包机底部，一小片凸出的金属就会连通两个回路。其中一个回路负责加热，于是烤面包机内部的电流开始流动，加热元件开始工作。

另一个回路的任务更加有趣。回路中的电子流经的线路绕着一小块铁转了一圈又一圈，最后再回到插座里——对电子来说，这样的路线可能有些晕头转向。电和磁密不可分，电子流经导线时会在导线周围产生磁场，如果电流经过的是线圈，那么电子每流动一圈，这个磁场的强度就会增强一点，线圈中央的铁芯又进一步增加了磁场强度。这就是电磁铁，通电时它会产生磁性，一旦电流归零，磁场也随之消失。压下烤面包机的工作杆时，你在烤面包机底部制造了一个原本不存在的磁场。面包托盘是铁质的，所以托盘会被吸在这块电磁铁上。换句话说，我在冰箱里翻找黄油的时候，一个临时的磁场将面包托盘固定住了。烤面包机侧面有一个计时器，一旦回路接通，计时器就会开始工作。只要时间一到，计时器就会切断电路。失去了电流的电磁铁无法维持磁性，在弹簧的作用下，面包托盘向上运动，面包片就弹了出来。

有时候，我会忘记给烤面包机插电，不过我很快就会回过神来，因为电磁铁没有通电，无法吸附托盘，所以工作杆一定会弹回来。这套机制如此简单，却又如此精巧。我们每一次烤面包片都是在利用电和磁之间的基本关系。

电磁铁用途很广，因为人们可以用它轻松地控制磁性。扩音器、电子门锁和计算机硬盘驱动器里都有电磁铁，需要持续供电，否则磁场就会消失。冰箱贴那样的磁铁叫作永磁体。你不能控制冰箱贴磁性的有无和大小，而它们也不需要能源。电磁铁在通电时的特性和冰箱贴一样，但只要停止供电，它的磁性就会消失。

我们周围到处都是微型磁场，有的是永久性的，有的是临时性的。这些磁场几乎都是人造的，它们要么有某种实际用途，要么是某个元件完成自身任务时产生的。这些磁场影响的范围通常很小，所以你只有凑得很近才能探测到它。不过，除了这些小磁场以外，还有一个大得多的磁场笼罩着我们的行星，而且它是纯天然的。我们感觉不到它的存在，但却时时刻刻都在利用它。

指南针和大陆漂移

我们早已对指南针习以为常，尤其是热爱远足的人们。指南针的指针标有N的一端永远指向北方，这为我们提供了很多便利。如果你有10个、20个，甚至200个指南针，把它们全都摆在你面前的地板上，那么每个指南针标有N的一端都会指向北方。你总会发现，无论你看还是不看，无论放在哪里，指南针标有N的一端始终会指向北方。你可以把这些指南针送到世界上的任何一个地方，然后重新把它们一字排开，结果都是一样的。无论你是在城市、沙漠、森林还是山地里，地球磁场永远与你同在。我们生活在这个巨大的磁场中，虽然人类永远无法感觉到它的存在，但指南针会悄无声息地提醒你，它就在那里。

指南针是一种非常简单的工具。它的指针是一块磁铁，磁铁的两端分别是N极和S极。这表明指针一端指向地磁北极，另一端则指向地磁南极。取两块磁铁，让它们彼此靠近，你会发现你得花很大的力气才能让两块磁铁的N极贴到一起，但两块磁铁的N极和S极之间却有极强的引力。借助这一点，我们可以轻松地探查磁场方向：在磁场里放一小块磁铁，让它自发旋转，稳定下来之后，它的N极和S极指向与磁场方向相反。这就是指南针的原理：活动的磁性指针会指出它所在的磁场方向。我们看不到地球产生的巨大磁场，但可以通过指南针的指针观察它。指南针不光能感知地球的磁场，举着指南针在家里转一圈你就会发现，插

座、钢制锅、电气设备、冰箱贴，甚至近期接触过磁铁的铁制品周围都存在磁场。

显然，指南针最重要的用途是导航。在一个球体的表面上确定自己所在的位置从来就不是易事，但地球的磁场为古往今来的探险家们提供了非常可靠的工具。地球拥有地磁北极和地磁南极，只要手边有一个指南针，你就能轻松判断南北。作为一种导航工具，磁铁制成的指南针直观、廉价，而且不需要任何能源。但是，指南针也有缺陷，排名第一的缺陷听起来非常严重：地球的磁极并不是固定不变的，它会发生漂移，有时候甚至会漂移很长一段距离。

在我敲出这段话的时候，地磁北极位于加拿大北部，距离“真正的北极”约430千米。这里的“真正的北极”指的是由地球自转轴确定的地理北极。在一年的时间里，地磁北极可以移动42千米。如果以现在的趋势推测，地磁北极将跨越北冰洋，向俄罗斯的方向前进。对航海家来说，这个消息听上去非常糟糕。但地球真的很大，磁极漂移带来的影响或许没有我们想象的那么严重。地球磁场的细微变化自有其内在的原因，这一现象也提醒了我们，我们脚下这颗星球绝不仅仅是一个静态的岩石球。

在我们脚下的地底深处，富含铁的地核外层正在缓慢地运动，将内部的热量送到外层。地球的自转迫使熔化的岩浆随之转动，由于铁的存在，黏稠凝滞的地核外层成了电导体，甚至很像烤面包机里的电磁铁。科学家认为，地核外层中的电流随着地球而转动，造就了我们这颗行星的磁场。既然地磁来自缓慢移动的岩浆，那么岩浆运动的微妙变化自然会影响地球磁场，造成磁极漂移。地球磁轴的方向与自转轴大体一致，这是因为地球的自转带动了富含铁质的岩浆旋转，同样也是这个原因，磁轴和地轴的方向只是大体一致，而非完全吻合。

如果你非常在意导航的准确性，那就需要根据磁极的实时方位修正指南针的指示结果，因为地磁北极并不是真正的地理北极。现在的地图会同时标出这两者的位置，我看过英国国家测绘局（Ordnance Survey）发行的英国南岸局部地图，地图上方同时标出了地理北极和地磁北极。如果你完全按照指南针指示的方向朝北方前进40千米，最终你的位置会向西偏差1千米。地图似乎是永久不变的，但用来导航的磁场

却没那么稳定。现代技术可以保证我们不会因为磁场带来的偏差而时常迷路，但即便装备了目前人类最先进的导航技术，航空业仍需高度警惕地球磁场带来的误差，所以机场必须不断更改跑道上的标志。

下次去机场的时候，请注意观察每条跑道起点处的巨大标志。全世界的所有飞机跑道都会标有数字，其大小等于跑道偏离正北的方向角数值除以10。举个例子，格拉斯哥普雷斯蒂克国际机场的一条跑道标着数字12，这代表降落在这条跑道上的飞机机头角度是120度。每条跑道都会标出一个从01到36之间的数字。[86]这个角度的测量基准是地磁北极，因为这是根据指南针来定的。在2013年，12号跑道变成了13号跑道，这是为了与漂移后的地磁北极保持一致。跑道没有动过，但地球磁场动了。航空管理机构时时刻刻注意着这方面的动向，有必要则更改跑道的标志。地球磁极移动的速度相对很慢，所以这样的修正还可以接受。

磁极漂移只是个开始。地球不稳定的磁场影响的不只是导航。地磁变化留下的蛛丝马迹帮助人们最终确认了地质学历史上最简洁、最基础也最具争议性的理论：大陆板块（主宰地球表面的巨大岩石块）漂移说。



20世纪50年代，人类文明飞速进入全新的科技时代。现代社会的根基已经初现雏形：微波炉、乐高、魔术贴和比基尼先后登台亮相，并且开始普及。人类迎来了原子时代，人们的生活方式有了颠覆性的改变，信用卡也在这时问世。然而，尽管现代化的进程快得让人眼花缭乱，人们对自己居住的这颗行星依然所知甚少。地质学家一直在狂热地为各种岩石编制目录，但他们却无法解释地球本身呈现的问题：山脉是怎么形成的？为什么会有火山？为什么有的岩石非常古老，有的岩石又那么新？不同地区的岩石为什么差异巨大？

许多现象亟待解释。南美洲东岸和非洲西岸的轮廓线极其相似，看起来就像是两块相邻的拼图。除了轮廓线以外，这两条海岸线上的岩石种类和化石类型也高度吻合。难道这些全都是巧合？但大部分科学家从未深入思考过这些问题，大陆实在太大了，谁也没想过它竟然会动。20

世纪早期，一位名叫阿尔弗雷德·魏格纳（Alfred Wegener）的德国研究者终于将各方面的证据拼凑在一起，提出了“大陆漂移”假说。魏格纳提出，南美洲和非洲曾经彼此相连，后来这片巨大的陆地裂成了两半，越漂越远。当时几乎没有哪位科学家把他的话当真，大陆这么庞大的东西也能漂移大约4800千米？这听起来简直是天方夜谭。就算魏格纳说的是真的，那么是什么力量推动了大陆漂移呢？魏格纳认为，海床上的沟壑是大陆漂移时摩擦形成的，但他无法提供任何证据。魏格纳既说不出大陆漂移的原因，也无法描述漂移的具体过程，所以他提出的假说很快就被人们束之高阁。此后也没有人提出更好的理论，这个问题一直悬而未决。

到了20世纪50年代，人类仍未解开南美洲和非洲之谜，但科学家们有了一些新的发现。火山喷出的岩浆里富含铁元素，人们发现，其中有一种化合物的微粒在磁场中会像指南针的指针一样转动。等到岩浆冷却形成岩石以后，这些铁矿微粒也会被固定下来无法继续转动。也就是说，含铁的火山岩会记录下岩石形成时地球磁场的方向。地质学家开始利用这一点研究地球磁场在漫长岁月中的变迁，结果发现了一些更有趣的事情。地球磁场的方向似乎每隔几十万年就会倒转一次，原来的地磁北极变成了地磁南极，原来的地磁南极则变成了地磁北极。这似乎并不重要，但十分古怪。

接着，地质学家开始探查海床。地球结构有一个未解之谜：海床大部分区域都是平坦的，但几个大洋底部却耸立着宏伟的海底山脉，谁也不知道这些山是从哪儿来的。最著名的海底山脉是大西洋中脊，这条山脉由许多火山组成，它始于水面之上的冰岛，随后沉入波涛之中，在大西洋底蜿蜒，一直延伸到南极洲附近。1960年的磁场测量数据表明，这道山脊周围的岩石表现出了奇怪的磁性。它们产生的磁场是带状的，而且磁场带的方向平行于大西洋中脊。从这条山脊开始往外测量，海床上的岩石产生的磁场先是指向北方，然后转向南方，然后再次转回北方，而且这样的带状磁场沿着大西洋中脊延伸，始终保持一致。更奇怪的是，山脊两侧的磁场完全呈镜像排列。

1962年，两位英国科学家德拉蒙德·霍伊尔·马修斯（Drummond Hoyle Matthews）和弗雷德·瓦因（Fred Vine）找到了这些现象之间的

联系。[87]事后去看，你几乎能听到所有奇怪的线索拼到一起时发出的咔嗒声。他们提出，在大陆漂移分离的过程中，海床上的火山也许会不断喷发，形成新的海床。海底山脊最高处的磁性符合当时的地球磁场，但是随着大陆的漂移，山脊处的岩石会不断向坡底移动，同时火山喷发形成新的岩石。等到地球磁场发生逆转的时候，刚刚喷出的岩浆磁性也会随之逆转，形成磁极方向相反的新的岩石带。山脊两侧的磁场条带之所以会呈镜像排列，是因为每一条岩石带都代表着磁极方向相对固定的一段时期，直至磁极发生逆转。同时期的其他发现表明，原有海床在大陆漂移的过程中会不断被摧毁，这一点非常重要，因为地球本身的大小是不变的。在南美洲的另一侧，安第斯山脉之所以会存在，是因为太平洋原有的海床被推入大陆板块下方，重新进入地幔。只要你知道了大陆板块会漂移、碰撞、分离，在这个过程中它们会不断摧毁旧海床、创造新海床，那么我们之前提到的地质谜团就都有了合理的解释。板块构造论的发现是地质学领域的一块丰碑，现在，这套理论已经成为我们理解地球结构的基础。

大陆的确会发生漂移，但它们不会摩擦海床。大陆板块漂浮在地幔上方，地壳之下的对流为它们提供了推力。时至今日，大陆的漂移仍未结束。目前，大西洋仍在以每年2.5厘米左右的速度继续变宽。[88]新的磁性岩石带仍在不断形成。要说服科学家地球表面的大陆竟然能够移动，这需要坚实的证据，海床奇怪的磁性模式提供了不容置疑的证明。今天，我们可以用高精度GPS数据测量所有大陆的移动，也能看到地球的运动。但在几十年前，在地球岩石中沉睡了千万年的磁性材料为我们提供了证明大陆漂移说的关键证据。

最后一块拼图

电和磁的协同作用至关重要。人类的神经系统利用电来传递信号，电驱动了我们的文明，而磁让我们能够储存信息、操控看不见的电子完成各种任务。文明竟能如此彻底地让人们感觉不到电磁的世界，这实在是个了不起的成就。普通人很少有机会遭遇电击或者停电，我们如此善于掩饰电场和磁场，以至于大部分人根本意识不到它们的存在。这一方面展示了我们对电磁强大的控制力，另一方面又显得相当可悲，因为我

们心甘情愿地远离了那个精彩绝伦的世界。但是，未来的某些新东西或许会提醒我们，让我们不至于将电和磁彻底遗忘。

人类文明正在试图摆脱对化石燃料的严重依赖，前方有一条越来越清晰的出路。发电不一定要在荒郊野外的发电厂进行。生产可再生能源的发电站可以设置在离家园更近的地方，或许在未来，我们将有更多机会看到自己用的电来自哪里。我戴的手表上就有一块太阳能电池板，现在这块表已经兢兢业业地工作了7年。在窗旁收集太阳能的技术已经问世，除此以外，我们还能收集走路产生的动能和波浪产生的能量。这一切都基于电和磁的基本原理。

关于电和磁的拼图还剩下最后一块。烤面包机让我们看到了电流产生的磁场，但磁场也能产生电场。如果在导线附近移动一块磁铁，电子之类的带电粒子也会受到推力，这意味着运动的磁铁会创造出电流。这不是什么未来的高科技，这就是现代电网使用的基础技术。控制导体和磁场之间的相对移动，让变化的磁场推动电子，转换出电能——靠燃气和核能推动的汽轮机和手摇发电的收音机都在利用这个原理。风力发电就是最简单、最美好的电磁转换案例。

高高的风力发电站看起来平和而安宁，白色立柱支撑着转动的优雅扇叶。但只要你走进塔基，就会看到平静之下的不平静。这里充满了低沉嘈杂的嗡嗡声，你会觉得自己仿佛一步迈进了某个巨型乐器的肚子里。定期对访客开放的风力发电站为数不多，我曾在英国东部的斯沃弗姆参观过一处。这趟旅程戳破了我脑子里的美丽想象，但我觉得不虚此行。

沿着旋转楼梯向上攀爬时，时强时弱的嗡嗡声一直伴随在我左右。你可以感觉到风正在摇撼整座高塔，眼前的光线开始闪烁，你知道自己离塔顶越来越近，因为转动的扇叶有规律地遮挡了自然的阳光。突然间，眼前豁然开朗，在离地67米的高度，你进入了一个封闭式的全景看台，发电机的转轴就在你头顶上。现在，所有平和安宁的感觉已经彻底消失，三片长达30米的巨型扇叶在你头上呼呼转动，让人感到震撼。毫无疑问，高空中充盈着待收割的能量，风时强时弱，扇叶的转速也随着风力的变化不断起伏，几乎完全同步。单单这一点就给我留下了深刻的

印象。

但风力发电机最关键的部分隐藏在扇叶后面的转轴座里。如果我把鼻子贴在玻璃上使劲抬头，就能看见整个轴座。在我头顶，转轴的外圈绕着固定的内圈稳定地旋转。外圈的内衬是一层强磁性的永磁体，而内圈则衬有一层铜线圈，与回路相连。转动的磁铁会在线圈内引发感应电流，运动的磁场推动电子在线圈中流动。尽管磁铁和铜线并未直接接触，但这套系统却将扇叶转动的能量转化成了回路中的电能。扇叶驱动磁铁绕线圈旋转，根据电和磁的定律，线圈中必然产生电流。这就是风力发电机的工作原理。

其他所有发电站背后都有这个原理，无论它们使用的能源是煤炭、天然气、核还是波浪。外来的能源推动磁铁绕线圈转动，动能通过这种方式转化为电流。风力发电机的美妙之处在于，它的发电方式非常原始，风直接推动磁铁产生电流。如果换成烧煤的火电厂，我们就需要用煤来加热水，再利用水推动蒸汽涡轮机转动磁铁。这两种发电方式得到的结果完全相同，但火电厂需要的中间步骤更多。你每一次插上插头，都是在使用运动的磁铁推动铜线中的电子产生的电流。电和磁形影不离，难分彼此。支持人类文明的主要能源全都来自这对双胞胎兄弟默契的舞步。今天，我们将它们深深地隐藏起来，电和磁的世界被我们砌进墙壁、埋入地下。现在的孩子或许一生都不会直接看到或体验到电和磁，我们为那个奇妙的世界盖上了一件隐身的斗篷，我们的后代也许再也体会不到电磁有多么奇妙，多么重要。我们不能任由这样的事情发生，因为人类文明的经纬全都由电磁的丝线织成。

第9章

不同的视角

我们每个人都离不开三套关乎生存的系统：人体、地球和人类文明。这三套系统密不可分，因为它们存在于同一个物理框架下。要维持生命、促进社会繁荣发展，我们能做的最大努力便是尽量深入地理解这三套系统，这不仅能满足我们的好奇心，同时也具有深远的现实意义。因此，本章将以独特的视角分别审视这三套系统。

人体

我正在呼吸，你也一样。我们的身体需要吸入空气中的氧分子，排出体内的二氧化碳。每个人都拥有一套个人维生系统，那就是自己的身体。我们的身体可以完成许多工作，但它必须从外界获得补给：能量、水与合适的分子级“积木”。

呼吸是我们获得补给的途径之一。细究之下，你会发现呼吸的机制相当巧妙。你扩张胸腔、增加肺容量，较远处的空气就会把口鼻附近的空气分子挤进你的气管。深吸气时，你的胸腔进一步扩大，为即将到来的空气留出更多空间，让它们冲进你的肺里，与肺内的微小结构发生接触。接下来，你放松胸腔周围的肌肉，肋骨在地球重力的作用下向下运动，迫使肺里的空气分子相互推挤，最后通过气管排出体外，重新回到外面的大气中。吸入肺部的空气里能被你的身体利用的不仅仅是氧分子。空气经过鼻腔里的嗅觉细胞时，数十亿个分子中总有那么几个会与感知嗅觉的关键分子发生碰撞，它们会巧妙地契合，就像钥匙插进锁孔。这番结合向大脑输送一个信号，你就会知道自己闻到了某种气味。空气中少量特殊的分子正好被送到了正确的地方。我们的身体就这样获得了来自外界的信息。

人体由细胞组成，人体的细胞总数大约是37万亿个。每个细胞都是一间微型工厂，需要补给和安稳的环境，包括适当的温度、湿度和pH。你在这世间行走时，你的身体一直在不断地调整自身，适应周围的环境。如果你在温暖的房间里待得太久，靠近皮肤表面的分子就会振动得更快，因为它们获得了更多能量。这些振动传递到身体更深处，就有可能扰乱细胞的正常工作。因此，当房间里温度较高的时候，你的身体需要散热。这听起来似乎很简单：水分子在温暖的环境中很容易蒸发并带走热量，而你的体内有大量可供蒸发的水。然而，这些水都被锁在你的体内，很难穿过人体表面，所以你需要出汗。

人体皮肤最外层的细胞下方有一层薄薄的脂肪分子，这道藩篱隔绝了人体内外的液体。不过，如果环境温度较高，你的皮肤就会悄悄打开这道藩篱上的“阀门”，也就是你的毛孔。通过毛孔，汗水从体内穿过了防水的脂肪层。一个个水分子在温暖的皮肤表面聚集起来，直至获得足够的能量，蒸发出去。这些分子一个个离开你的身体，你的皮肤也因此变得更加凉爽。如果汗水带走了足够的热量，皮肤上的毛孔就会关闭，再次隔绝身体内外的液体。你的皮肤不能完全防水，这一方面是为了排汗，另一方面也是为了吸收外界的水分，为身体补充水分。血液是人体内的补给系统，它负责调度和分配包括水在内的很多资源。为了支持人体所有健康的细胞，这套系统必须一刻不停地运转，我们可以通过脉搏来检验血液系统的运转是否正常。

脉搏是一种三维的扰动，它实际上是一道运动的压力波，反映着血流的情况。我们的心脏不断挤压心房和心室中的血液，增加心脏内部液体的压强，迫使它们进入动脉。心脏的收缩强劲有力，一旦这种收缩停止，心脏内的液体压强就会下降。现在血液受力的方向发生了逆转，但是由于心脏和动脉之间有一道单向的“阀门”，所以刚刚进入动脉的血液不会回流。血液造成的瞬间压力会让阀门关闭，接下来血液还会继续挤压阀门的组织。这股力量十分强大，血液会因此向外压迫周围其他组织，于是压力波沿着血管传遍全身，对所到之处的所有肌肉和骨骼造成轻微的压力。大约6毫秒后，压力波传到身体表面，如果你用听诊器或者耳朵紧贴某人的身体，你就会听到它的搏动。如果波无法在人体组织中传播，我们就无法听到自己的心跳。事实上每次心跳都分为两个节

拍："扑——通"，因为心脏内共有四道阀门，它们总是轮流成对开闭。物理学和生理学结合产生的心跳是生命最重要的广播信号，它的影响范围遍及整个人体。

出汗以后，血液中的水分子数量必然减少，于是你的身体需要从外界补充水分。要完成"喝水"这个简单的任务，你的全身细胞需要协调合作。你的大脑需要发现你口渴了，还要做出喝水的决策，并且协调身体各部位完成喝水的动作。

脑细胞本身毫无用处，它必须与身体更远端的其他细胞建立联系，然后才能发挥作用，在我看来，这里涉及的网络与脑细胞同样重要。神经纤维负责传递身体内部的信号，这是细胞组成的细线，就好像体内的导线。一旦发出，电信号就会沿着神经纤维涟漪般地扩散出去，就像被推倒的多米诺骨牌。一条神经纤维的末端连接着另一条纤维，带电粒子的舞步推动信息跨越两条纤维，让下一组多米诺骨牌继续接力、传递信息。短短几分之一秒内，信息到达腿部肌肉。在生物电信号的协调下，坐在沙发上的你站了起来，准备去给自己倒杯水喝。脚下地板的触感，还有运动产生的微风为皮肤温度带来的细微变化，这些信息又通过其他电信号反馈回你的大脑。

每时每刻都有无数信息在我们体内川流，有的信息通过电信号传播，有的由激素之类的化学递质传递。人体内的多种器官和结构之所以能构成一个协调的整体，是因为连接各器官的不仅仅是资源，还有信息——协调一致、互相印证的信息洪流。不必等待信息时代的到来，我们的身体早就可以高效而精确地传递大量信息了。

这些信息分为两类。第一类是在我们体内时刻流动的信息，比如用神经信号和化学信号传递的信息。除此以外，我们还携带着海量的静态信息，人体的DNA里藏着分子级的信息库。在我们周围的世界里，千百万个相似的原子结合在一起，形成玻璃、糖或者水。DNA链这样的大分子的构造更加复杂，它包含很多不同的原子，这些原子独特的排列方式呈现了一份人体密码表。细胞内的微型工厂可以沿着DNA的长链读出A、T、C、G四种基因密码排成的密文，并依照这些信息来构建蛋白质、调整细胞活动。和原子比，人体如此庞大，细胞工厂当然需要DNA

里的海量信息。

人身就像一台复杂的机器，单单一个细胞可能就包含了10亿个分子。要让这么多细胞协同工作，我们需要强大的通信系统和运输系统，还需要足够的时间。人类的反应速度不会快如闪电，因为人体太复杂了，所以我们要完成任何一个动作都必须消耗不少时间。人们用“眨眼之间”（大约1/3秒）来形容极快的动作，但一眨眼的时间已经足够让我们的身体制造出数百万个蛋白质分子，让数十亿个离子越过神经突触，在这段时间里，你可能只完成了一点点动作。

当你从一个房间走向另一个房间时，你的体内有大量的信息在传递。这套庞大的系统会让你了解周围的环境。现在，你要喝水。人体拥有内置的传感器，会感知环境的变化，并将搜集到的信息传递给大脑，其中最容易被我们注意到的可能是视觉信息。

我们周围的空气中布满了波，但我们能够看到的光波极其有限。我们的瞳孔哪怕扩张到极限，直径也只有几毫米。波的海洋携带着外部世界的信息，其中大部分我们根本看不见，只有可见光会进入我们眼中的小孔，我们却由此获得了习以为常的海量视觉信息。我们的身体会对接收到的光波进行整理，从中提取信息。眼睛是我们观察世界的窗户，它的最外层是一层柔软透明的“镜片”，这层镜片会将光速降低至空气中光速的60%。减速后的光会发生偏转，而眼部周围的微小肌肉会调节镜片，就像拍照时调整焦距一样。这个过程令人惊叹。我们以为自己看清了所有细节，但实际上我们只是提取了需要的信息，然后将这些信息组织成一幅画面。

击中视网膜的光可能来自月亮，也可能来自被灯光照亮的手指，但它们带来的影响有相同之处。它们都会被视网膜上的视蛋白吸收，由此引发一串多米诺效应，向我们的控制系统发送电信号。口渴的你走进厨房，水槽、龙头和水壶反射的光纷纷进入你的眼睛，你的大脑在一眨眼的时间里就处理完了这些信息，然后大脑会告诉你该怎么做。如果厨房里有点暗，我们会打开电灯，释放出大量光波。这些光波向外辐射，并在传播的过程中不断被外界反射、折射和吸收，最后剩下的那部分才会进入我们的眼睛。除了光以外，还有很多东西在我们周围流动。

人是社会性动物。我们利用通信工具收发信息、维护社交网络。声音就是一种最特别的通信工具，每个人的嗓子都是最灵活的乐器，我们利用它来制造、调整、发射声波。每个英国人在泡热茶的时候都会邀请屋子里的其他人共饮一杯，我们用声音发出邀请，其他人通过耳朵接收信号。你发出的邀请会在别人体内触发一道新的信息洪流，他们会对听到的声音进行拆分、重组、分析，最后，神经纤维调动声带肌肉做出得体的回答。得到回复以后，我们会按照当前的需求改造外部世界，重新排布面前的瓷器和金属餐具。

我们的身体由许许多多不同的原子组成，这样的多样性固然美妙，但也有个坏处：原子的排列方式直接限制了我们的能力。不过，人类是改造环境、利用工具、突破局限的大师。我们不能用手捧着水把它烧开，但我们知道如何用铁壶烧水。我们不能把自己身体的一部分变成存放干树叶的密闭容器，但可以使用玻璃罐子。我们没有爪子、甲壳、獠牙，但我们可以制作刀子、衣服和开罐器。我们用陶瓷容器盛放热饮，隔热的陶瓷可以很好地保护我们敏感脆弱的手指。除了木头、纸和皮革这类天然材料以外，我们还拥有金属、塑料、玻璃和陶瓷。

水壶能容纳水分子，还能在微观层面以振动的方式将能量传递给这些分子。现在，这些水分子无规律运动的速度比先前快得多了，于是我们把它们倒进了陶瓷制成的新家。令人沮丧的是，我们只能从热茶溅起的水花中瞥见分子运动的浮光掠影，这一切就发生在我们的眼皮底下，但我们就是看不见，因为我们的神经系统处理信号的速度不够快。现在你已经看不清杯底了：加入牛奶以后，杯中的液体变得浓稠了，数百万个微小的脂肪液滴在不断地反射光线，让我们看到这一点。

在人类改造世界的过程中，我们早已习惯了自己的身体被某种力量牢牢地钉在地面上，仿佛这是天经地义的事情。如果地球重力比现在强，那么我们或许需要更粗壮的双腿，直立行走也会变得更加困难。如果地球重力比现在更弱，那么人类或许会演化得更高，但生活节奏却会放缓，因为所有物品坠落到地面的时间都会变得更长。当你向前迈步的时候，是地球重力迫使你伸出的那只脚在身前落地，你以静止的脚为轴转动，等到迈出的那只脚落地，你的整个身体就会向前运动。没有重力，我们根本没法走路，我们整个身体的演化都在适应重力。我们的体

形和身高正好适合直立行走。你端着一杯水走向门口时，你的身体很像一个倒挂的钟摆，你的两条腿轮流向前摆动，转轴是另一条腿和你的髋部。摆动的规律决定了你行走的节奏，进而影响着杯子里的液体，迫使它以相同的节奏荡漾。

走路的时候，你会利用脑袋里的液体来帮助自己保持平衡。这些液体在内耳深处的细管中荡漾，启动和停止都有一定的延迟。管壁上的传感器会向脑部的神经网络发送信号，帮助你判断下一步该如何调动肌肉。

就在这时候，你走到了门口，用空闲的那只手推开门，走向外面的世界。

地球

在户外，你可以举目四顾，透过看不见的大气观察周围的世界。我们的星球由五个相互关联的系统组成：岩石、大气、海洋、冰和生命。每个系统都有独特的韵律和运转方式，它们彼此纠缠、永不停歇的舞步造就了我们眼前这个多姿多彩的世界。同样的力驱动着所有系统，有时候你会在完全意想不到的地方发现相似的规律。我们透过天空中看不见的分子向高处张望，浮力的差异推动无数空气团上下对流。有的空气从我们刚刚走出来的那幢建筑物中吸收了热量，于是它开始上升，因为它的密度小于周围的其他空气。来自温暖地面的上升气柱可能会延伸到几千米的高空中，它们只需要大约5分钟时间就能上升1千米。在地球重力的作用下，温度较低、密度较大的空气会向下沉降，填满暖空气留下的空间。在我们目力所及之处，这样的对流运动无所不在。空气永远不会彻底停止流动。

深海之下也有类似的对流，而且这些对流你同样看不见。北大西洋寒冷的高盐度海水会沉向海底，就像致密的冷空气一样；到达海床后，这些冷水会沿着海底流动，直到获得热量或者与其他盐度较低的海水混合，重新浮向海面。在天空中，空气或许只需要几个小时就能完成一次对流循环，但在海洋中，完成这样一次对流可能需要4000年，在这个过程中，海水甚至可能周游地球。

此时此刻，我们脚下的岩石也在运动。地幔是地球最重要的组成部分，厚厚的地幔位于外层地核和漂浮的薄薄地壳之间。地幔是黏稠的液体，它的运动十分缓慢。灼热的地核和埋藏在地幔深处缓慢衰变的放射性元素都会加热地幔的熔岩，此时此刻，这样的能量转移正在地底深处的岩层中进行，它就发生在我们脚下。灼热的地幔岩石变得更加轻盈，于是它开始上浮；与此同时，温度较低的岩石会下沉取代它原来的位置。但在这样的温度和压力下，熔岩移动的速度非常缓慢。我们脚底深处的熔岩流可能需要一整年才会上浮2厘米，它要完成从底层浮到顶层、再沉回底层的完整循环，可能需要5000万年。但地核与大气、海洋遵循着同样的物理规律，它的热量会不断地自内向外传递。

地核持续不断地向外传递大量的热，但比起太阳赠予我们的热量，地核的热量显得微不足道。在地球上，从广袤的原野到逼仄的角落，绿色几乎无处不在。也许只是砖墙上一抹若隐若现的苔藓，也许是雨林中繁茂生长的参天巨树，无论如何，植物是随处可见的。每片叶子里都有一层层富含叶绿素的细胞，每个细胞都是一间分子级的工厂，它们将阳光和二氧化碳转化为糖和氧气。光的洪流冲刷着每一片叶子，其中一小部分能量会被这些细胞工厂捕获，然后以糖的形式存储起来，作为未来的养分。哪怕是在最宁静的晴天，哪怕周围的一切看起来纹丝不动，植物也一直在忙碌地工作。每个分子都在辛勤劳动，生产可供我们呼吸的氧气。这足以让地球上所有的生物生存下去，足以维持氧含量高达21%的大气。这些小小的分子级工厂不断更新着占大气总量约1/5的氧分子。当我们举目四顾，目光穿透的空气分子实际上来自数以百万计的蕨类、树木、水藻、青草和其他植物，这支绿色的大军已经不知疲惫地工作了千万年。

就算走到屋子外面，我们能看见的也只是这个世界的一小部分。如果人类能够飘到空中，那么我们的视野就会变得更加广阔。向高处飘的空气分子被重力拉住，只能在地球表面维持薄薄的一层大气。如果你能上升到最强烈的雷暴上方（大约20千米的高度），那么90%的大气分子都会被你踩在脚下。海底最深的地方距离海面大约有11千米，继续向下6360千米，你就会到达地心。如果没有火箭，人类最多只能上升到离地30千米的空中，在地球的边缘玩耍。这个高度与整个地球的大小相比，

差不多相当于乒乓球表面涂层的厚度与它的直径之比。

在100千米的高空中，我们正式来到了地球与太空的交界处。现在，你可以看到整个地球在你脚下旋转，绿色、棕色、白色和蓝色相间的球体在漆黑的宇宙中转动。从这里向下俯瞰，海洋的广阔堪称惊心动魄：这颗行星地表的绝大部分面积都被一种简单的分子覆盖。水是生命的画布，但只有宜居带[89]的能量等级才能允许水分子以液体的形式存在。如果赋予水分子额外的能量，它们的振动就会加剧，难以继续包裹其他复杂分子。要是能量进一步增加，水分子会以气体的形式飘到空中，再也无法保护脆弱的生命。在宜居带的最底部，随着能量等级的降低，水分子的振动也会变得更慢，最终水凝结成冰。这样的凝固和僵化是生命之敌，冰晶会刺破包裹液态水的活细胞。我们这颗行星之所以如此特别，不仅仅是因为它拥有水，还因为这里的水大部分是液态的。站在地球边缘，你将清晰地看到这种最珍贵的资源填满了你的绝大部分视野。

太平洋在你脚下缓缓掠过，也许在那幽暗的深海中，有一头蓝鲸正在发出低沉的召唤。如果海面下的这束声波拥有可见的形状，你会看到它像池塘里的涟漪般层层扩散。只需要一个小时，声波就会从夏威夷传到加利福尼亚州。但对于高空中的我们来说，水面下的声波不会留下任何可见的线索。大海里充满了各种各样的声音，海浪、船只和海豚发出的声音层层叠叠，彼此嵌套。南极洲冰盖的振动声可能在水下传播数千千米，但高空中的你完全觉察不到。

这颗行星上的万事万物都在转动，每天围绕地轴一圈。风从转动的地表吹过，流动的空气总是倾向于直线运动，但地面的摩擦力和周围其他空气的阻力会影响它的运动轨迹。在高空中，你会看到地球自转带来的影响：北半球的风总是相对于地面向右旋转，所以地面上的天气现象，尤其是远离赤道的天气现象，也会随之变化。飓风和海面上较小的风暴都是螺旋形的，风眼就像轮子的转轴，这些“轮子”之所以会转动，完全是因为地球在永不停歇地自转。

南极洲上空，厚厚的雪云正在聚集成团。每朵雪云内部都有数十亿个气态水分子，它们同氧分子和氮分子混合在一起，彼此推挤、碰撞。

云的温度降低了，这些分子对外散失了能量，运动速度减缓。速度最慢的分子撞上初具雏形的冰晶就会立即黏附上去，在冰的网格中找到一个固定的位置。雪花在云层内部上下翻滚，原始六边形冰晶上的所有分子处境完全相同，它们各自坚守自己的位置。冰晶黏附的分子越来越多，对称的雪花渐渐长大。经过数小时的缓慢成长，这些晶体承受的重力也越来越大，最终它们离开云层底部，开始向下坠落。云层下方是南极洲的冰盖，这片冰层绵延数千千米，最深的地方厚达4.8千米，在地球上首屈一指。聚集成片的冰盖异常沉重，它们的重量迫使南极洲的陆地向下沉降。但这片广袤冰原中的每一个分子最初都来自雪花，雪花需要漫长的时间才能堆积成这么宏伟的冰盖。南极洲冰盖中的一部分水已经在这里冻结了数百万年，在这漫长的岁月中，冰晶内部的分子以自己的固定位置为中心一刻不停地振动，但它的振动速度太慢，不足以让冰融化成水。与此相对，夏威夷火山喷发的岩浆分子在到达地面后温度终于降到了600℃以下，在此之前的45亿年里，它一直保持着高温。

来自太阳的能量是推动地表系统运转的发动机。阳光温暖了岩石、海洋和大气，也帮助植物生产出糖分、养料，在这个过程中，它也在不断打破地表系统的平衡。只要能量的分配失衡，事物就会发生变化。坠落的雨滴冲刷着裸露的岩石，它携带的动能可以侵蚀高山。赤道上充沛的多余热能引发了热带风暴，狂风吹打着棕榈树，将海平面上的水重新送上山巅，推动波涛在海滩上拍得粉碎。储存在植物中的能量可以滋养枝叶、果实和种子。种子携带的基因信息将重新汲取来自太阳的能量，开启新的循环。太阳以源源不断的能量推动着看不见的发动机，让我们的星球变得生机勃勃，让地球不至于落入僵硬死寂的平衡。站在地球的边缘，我们看不见具体的细节，但大体的局势却尽收眼底：来自太阳的能量洪流冲刷着地球，这些能量在海洋、大气和生命体之间涓涓流淌，最后以地球辐射热的方式回到太空中。地球吸收和释放的能量总量达到平衡。这颗行星就像一道水坝，它会以各种各样的方式储存、利用宝贵的能量资源，最后再将这些能量放归宇宙。

我们开始向地面下降，海滩在我们眼中不再是一个地点，而是各种物理量的组合体，在海滩上，我们看到了尺寸、规模和时间的尺度。拍打海滩的波浪携带着来自远方海域的风暴能，浪头撞碎在海滩上，摇撼

着沙砾和石块。石头上的微粒在一次次的碰撞中不断剥落，每一颗鹅卵石都由千百万次随机碰撞塑造而成。冲掉一小片石头或许只需要1毫秒，但要让鹅卵石变得光滑圆润，那需要数年的缓慢打磨。若以地质年代的时间尺度去看，海滩的存在总是短暂的。海滩上的石头和沙砾不断经受摩擦和侵蚀，如果新的原料无法弥补摩擦造成的损耗，这片海滩终将消失在大海之中。岁月流转，沙砾随着海浪回归大海，上涨的潮水又把它们送回海滩上。我们热爱海边的潮汐，正是因为潮汐的存在，我们才有机会每天两次看到潮水的涨落重塑整片海滩。潮水将带走沙滩上的一切痕迹，落潮后光滑的沙滩拥有一种简洁之美。每天的潮涨潮落掩饰了海岸线以十年为单位的缓慢变迁。在这流动与变化中，生命在礁石间的水洼里蓬勃生长，它们早已适应了潮涨潮落带来的环境变化，无论是被彻底淹没在海水中还是被留在退潮后的礁石间，它们总会自顾自地成长。这些水洼的精彩程度不亚于博物馆的玻璃柜，每个水洼里都在上演一幕幕残酷的资源争夺战。生命体争抢资源的逻辑非常简单：尽量靠近地球循环系统提供的能量，尽力搜集构建生命所需的分子级积木。海滩上的水洼淋漓尽致地体现了生命的无常。只要有足够的能量和养分，水洼中的生命就会蓬勃生长；而在资源匮乏的时候，这些生命立即就会改投他处。各个物种变着花样利用自己与生俱来的“工具箱”，甚至利用基因突变。生物搜集能量、四处活动、通信、繁殖的过程实际上都是在通过不同的方式运用同一套基本规则。

能量的流动有一定之规，但地球总能不断回收利用资源。地球上几乎所有的铝、碳和金都已存在了数十亿年，只是它们会不断地从某种形态转化为另一种形态。你或许会觉得，经过了这么长时间，这些物质应该早已难分难舍地融合在一起，变成了行星尺度的一锅乱炖。但实际上，物理过程和化学过程会不断地整合这些混合物，让相似的原子聚集成团。在重力的作用下，液体能够轻而易举地渗透多孔的固体，所以水总会渗入土壤，进入庞大的地下蓄水层，而与此同时，土壤一直停留在原地。无数微小的钙基海洋生物在海面上生活然后死去，重力拉扯着它们的遗体缓缓漂向海床，有时候会在浅海中形成巨大的海底墓园。这些生物的遗体不断被挤压、转移，最后成为特殊的白色石灰岩。盐之所以会沉积下来，是因为水分子在得到能量时很容易变成气体，但盐却不会。海底山脊的火山喷出的岩浆密度远高于周围的海水，所以它会沉积

在海床上，形成新的岩层。生命总会不断汲取周围的物质，重塑外部世界，等到它死去以后，又会留下可供回收利用的碎屑。

在漆黑的夜晚仰望天空，你将看到来自太阳系另一端、银河系另一端乃至宇宙另一端的波。千万年来，光波是我们与外部宇宙之间的唯一联系，也是我们获知外界信息的唯一途径。直到几十年前，我们才开始观察抵达地球的微弱物质流——中微子、宇宙射线、引力波，这就是我们与外部宇宙之间仅有的联系。2016年2月，我们终于确认黑洞融合之类壮烈的天文事件也会释放出波，在空间中激起涟漪。每个人一生当中都会被引力波不断冲刷身体，但直到最近，我们才发现它。光和引力波在我们周围呼啸而过，织成一幅斑斓的锦缎，正是靠着这些介质，我们才能绘制出宇宙的地图，并在上面标出一个小小的箭头："我们在这里。"

不过，在地球上，在每一个平凡的日子里，我们有其他太多现实的问题需要考虑。站到地球之外俯瞰我们的家园，这样的视角会让我们重新认识到自己所属的这套系统是多么宏大。生命推动这套系统永不停歇地运转，而我们是所有生命中微不足道的一员。从智人诞生的那一刻起，每个人就拥有两套维生系统：自己的身体和我们这颗行星。不过现在，我们还发展出了第三套系统。

能够影响地球的物种有很多，但过去几千年来，只有一个物种能够根据自己的需求来改造周围的环境。现在，他们已经形成了自己独特的生命体系，这张行星尺度的大网连接着每一个有意识的个体。从生存的层面上说，这张大网中的每一个个体几乎都完全独立于其他成员，但对整体而言，每个个体都有自己的贡献。对物理学定律的理解是支撑现代社会的基石之一，如果做不到这一点，我们根本无法组织交通、管理资源、完成通信、做出决策。科学和技术催生了人类有史以来最伟大的成果：我们的文明。

文明

一支蜡烛、一本书，便携的能源，便携的信息——它们触手可及，而且足以传承几个世纪。这些丝线将个体的人类生命织成了更宏大的整

体：每一代人留下的成果借助这些纽带薪火相传，构成了我们协同合作的社会。文明中的能量必须不断流动，蜡烛几乎可以永久地储存下去，但只能燃烧一次。知识会不断积累，一本书可能启发无数人的思维。蜡烛和书籍早在两千年前就已诞生，直到今天，它们仍未消亡。这两种技术都很简单，但是有用。我们储存能量，分享利用能量的心得，并由此建立了现代社会。

提起文明，我们总会想到城市，但实际上，文明永远始于荒野。建筑、探索、尝试、失败和再次尝试都需要能量，所以人类必须借助植物来收获太阳能，由此支持这些活动。人类可以调度土壤、水和种子，但只有植物才能将太阳能转化为糖。我们学会了修建绿色的堤坝来拦截一小部分太阳能，也因此收获了奖赏。人类种下的庄稼拨动了地球的系统，由此收获的能量养育了我们和我们的动物，也赋予了我们改造世界的能力。

我们觉得自己生活在现代社会里，但这并不准确。我们离不开前辈留下的基础设施，这些东西有的只有几十年历史，有的能追溯到几个世纪以前，还有的已经传承千年。这些道路、建筑物和沟渠直到今天还在发挥作用，因为这些“血管”连接着人类社会最为偏远荒僻的角落。合作和贸易带来了巨大的利益，文明的网络让每一个人都有机会走向单靠自己的力量和智慧绝对无法到达的远方。

城市是建筑物的丛林，每一幢建筑都有其独特的功能和设计，但所有建筑脚下都同样埋藏着粗壮铜缆构成的庞大网络。铜缆的主干线伸出一条条卷须探入每一幢建筑，然后再层层分叉，通过墙壁和地板中的管线进入我们目之所及的每一个插座和开关。只要将插头插入插座，回路立即就会接通，电子开始自由流动，将你家里的设备和电网连接在一起。埋藏在城市里的缆线是现代生活的动脉，来自远方巨型电厂的能量通过这张网络来到我们身边。这张大网连通了各个国家，相互连接的金属网络汇集了巨量的能源，供养着城市这头怪兽。我们周围充满了漂流的电子，它们会随时按照我们的指令行事。

能源网络之上还覆盖着另一张大网，它的触角同样遍及每一座建筑，维系着我们的生活。地球拥有一套行星尺度的水循环系统，它连接

着大海、雨水、河流和蓄水层。太阳的能量促进了水的蒸发，推动水分子在大气中循环，让水去往地球上的其他地方。我们人类修建了局部的水利设施，引导水离开自然的循环，让它滋养我们的文明，最后再将它放回大自然中。雨水不再听从重力的召唤进入河流奔向大海，而是进入人类修建的水库。运动的电子提供的能源推动水泵，将水库里的水抽入直径近1米的管道，这些水又通过层层分叉的网络进入建筑物，流进千家万户的水龙头里。我们用完以后，水会通过排水沟和下水道的管路汇聚成流，回到污水处理厂或河流中。只要打开水龙头，你就能看到这张网络的一个末端节点，它是这个庞大回路中小小的一环。接着，水流进下水道，离开我们的视线，回到隐藏的管道中。只要我们完成第一个环节（将水抽到高处），打破最初的平衡态，重力就会接管剩余的工作，引导水流一路向下。在下水道的入口处，抵挡重力的支撑力突然消失，于是水从这里流了下去。

城市是网络最集中的地方，因为人类聚集在城市里，靠各种网络维持生命。我们熟悉的都市图景中不乏其他网络，比如食物配送系统、人类交通系统和分配资源的贸易系统，但只有清楚就里的人才能看到这些网络的运作过程。

火是人类探索人造光的起点。掌握了火，我们就学会了制造光，不再被动地依赖阳光。地球的自转会让我们进入远离太阳的背阴面，但只要有蜡烛，我们就能看清周围的东西。150年前，燃烧的蜡烛、木柴、煤炭和油灯释放的光波照亮了城市的夜晚。时至今日，无论昼夜，天空中总是充满了看不见的“光”。如果我们的肉眼能看到无线电波，那么你一定会发现，一个世纪以来，地球从未进入过真正的黑夜。这些波不能照明，却有别的很多用处。无线电波、电视信号、无线网络和手机信号织成了一张紧密协作的信息之网，它时时刻刻都在我们身边搏动。在我们的文明社会里，只要有合适的电子设备，任何人都能实时接收新闻视频、海运预报、电视直播、航空管制信息、业余无线电信号乃至朋友和家人的声音。这些波在我们周围一刻不停地流淌，你可以轻而易举地聆听它、分享它，这正是现代社会的美妙之处。信息流连接着我们的世界。农民可以根据超市本周的需求来制订收割计划，自然灾害的新闻能在瞬息间传遍全球，飞机可以变更航程来避开头顶的坏天气。如果天气

预报告诉你雨云将在10分钟内到达头顶，你大可推迟去商店购物的计划。这套系统之所以能流畅运行，是因为在人类的操作下，各种波可以并行不悖地工作。我们针对某些波制定了全球通行的规则，又为另一些波建立了全国统一的规则。纵观人类历史，绝大部分时期我们只有波而无网络。通过几代人的努力，我们建立起了以波为基础的信息网络，现在它已成为每个人生活中不可或缺的一部分。

过去，人类一直受限于地理状况造成的炎热、寒冷或贫瘠。如果周围的分子携带的能量过多或者过少，组成人体的分子就会受到环境的影响。如果人体内的分子动静之间的微妙平衡被打破，你就会感觉不舒服。时至今日，地理因素带来的限制几乎已被彻底破除。我们修起了建筑物、步道和屏障，生产了各种交通工具，在室内营造出最适合人体的舒适小环境。迪拜的空调和阿拉斯加的中央供暖系统为我们创造出了前所未有的宜居体验。我们开始觉得这一切都是天经地义的，全然忘记了真实世界的严酷和不便。在其他行星上建立殖民地对我们来说或许还很遥远，但人类已经开发的技术足以将地球变得更加舒适。这些技术也遵循着这类原则——按照人的需求和意愿精准调节周围环境。要实现这个目标，我们必须提供适量的水、分子级积木和能量。一个又一个人造的宜居之地在地球表面蔓延，不断扩展着人类的生存网络。

在文明的发展过程中，人们需要面临一系列挑战。人口数量越多，需要的资源和空间也越多。燃料推动了工业革命，开启了全世界的迅猛发展，但我们也需要为此付出代价。人类依然在种植庄稼，收获太阳能，从绿色的能源库中获取可供我们自由利用的能量，但这并不是现代社会能量的主要来源。地球早已将太阳能储存在一个巨大的能量库里，经过亿万年的沉淀，这座仓库里积累了超乎想象的能量，我们一直在利用它的库存。漫长的岁月中，总有一小部分储存着太阳能的植物会被埋藏到地底深处，经过压缩和提炼，这些植物最终汇成了一座巨大的能量宝库，无论地球的表层如何吸收、释放太阳能，地底深处的这座能量库一直岿然不动。这些古老的能量被我们称为“化石燃料”，人类很容易将这些能量释放出来并加以利用。利用化石燃料本身并不是问题，归根结底，地球储存的太阳能最终总会以某种形式重新回到宇宙中，但释放能量的过程却可能带来灾难。植物在生长过程中需要吸收二氧化碳，要是

你把植物储存的能量释放出来，这些二氧化碳也会重新出现，回归大气。飘浮在空气中的二氧化碳分子会改变波在大气中的传播路径，整个行星储存的太阳能也会因此略微增加。人类烧掉了亿万年来形成的化石燃料，整个地球也随之变热。我们需要发挥聪明才智才能学会如何掌握新的平衡。

但人类终归是心灵手巧的。现在，通过看不见的波组成的网络，我们可以进一步理解科学、医学、工程学和文化。这张信息网络中任何一点有用的知识都离不开一代又一代前辈的努力。

跳出自身的尺度，你必将发现更广阔的空间。人体和适合人体的结构都局限在一定的尺寸以内，组成我们的复杂系统决定了我们所需要的空间。床、桌椅和食物的尺寸不会变，因为每个人都生活在自己的身体里。不过，人类正在学习如何操纵更小的世界，在这个过程中，我们的视角尺度也会相应地缩小。我们渐渐学会了建造小得看不见的“巨型”工厂。尺度缩小了，完成任务所需的时间也随之减少，每一秒内都有数十亿个进程同时发生。在这么小的尺度上，电的流动变得更加轻松，从这个意义上说，计算机不过是由微小元件组装而成的电动加法机。对我们来说，计算机的尺寸不大，但是对于组成计算机的原子而言，这些功能强大的机器实在大得可怕。细想之下，计算机真正令人震撼的地方在于，它工作的时间尺度和体积尺度其实大相径庭。在今天，这既微小又庞大的加法工厂已经成为我们控制世界不可或缺的工具，而且随着时间的推移，未来的文明必将更依赖电脑。更拥挤的文明需要更高效、更迅速的决策，也需要更快的信息流来调节系统内部每一个精密的齿轮。要实现这些目标，我们必须跳出自己的体形尺度。

目前，我们仍受困于地球，但千百来，人类从未停止仰望星空。现在，我们已经可以从高处仔细观察自己的母星，这是人类文明史上的突破。地球观测卫星和通信卫星绕着我们的行星呼啸而过，它们联结着地球上的每一个人，也让地面上的我们得以俯瞰这颗旋转的星球。高空中的卫星可以清晰地看到我们的文明留下的印记：夜间明亮的城市灯光、寒冷地区城市周围的温暖空气，还有农耕活动在陆地上留下的不同色彩。在这些绕轨运行的人造天体中，有一个适合人类居住，那就是国际空间站。我们的文明的确已经开始向太空进发，尽管只迈出了一小步。

小小的空间站最多可以容纳10人，他们代表着人类，在轨道上以每圈92分钟的速度围绕地球旋转。在远离地面的高空中，这些宇航员必将获得看待人类文明的全新视角，他们或许永远无法完整地将这些信息传递给其他人，但他们也曾尽力尝试。

地球的磁场遮蔽了宇宙射线，保护着星球，在这层磁盾之外，越过卫星的公转轨道，我们的文明向外辐射的信号会减弱、消失。太空中不分上下，钟摆无法嘀嗒摇晃，因为它不再受到地球重力的影响。太空中发生的事情都很简单，对于人类而言，它们要么进行得极快，要么极慢。极快的核反应为太阳提供了能量，但在数十亿年的时间中，太阳变化的速度极慢。微小的原子相互作用，最终形成行星、卫星或星系。这颗复杂而混乱的行星上安放着我们复杂而混乱的文明，我们处于时空尺度的中间位置。

我们是已知宇宙中独一无二的存在。

我们遥望太空，太空中或许也有生命正在回望我们。直到现在，光仍是我们与地外宇宙之间的主要纽带，星光击中视网膜上的分子，联系着我们和外部宇宙。我们在这里，在这颗小小的岩石星球上。人类是地球表面上美丽、复杂而感性的生命，我们生活在宇宙和地球的分界线上。我们在这里，三套维生系统交相渗透，依照宇宙中通行的物理规则，维系着我们的存在。

我在这里，站在自己的屋子外面。空中的云汇聚成团，遮住了我凝望外部宇宙的视线。我在这里，作为一个现代人，我手握地球材料制成的马克杯，思考着宇宙的纷乱庞杂，因为我有这个能力。在我周围，规则无处不在，我可以亲手触摸它们。我低头望向茶杯，看到杯中旋转的液体。当我再次抬头，眼前的世界已经换了一副模样。杯中液面倒映的天空依然那么明亮、美丽、迷人，就在这里，在我的茶杯中，我能看见那场风暴。

致谢

撰写这篇致谢感言的奇妙之处在于，我要感谢的两批人其实很大程度上是重合的。有的人在本书制作、出版的过程中为我提供了不少帮助，有的人曾经出现在书中的故事里，他们分享的经历让我的生命变得更加丰富，也鼓励我去探索更多新知。我对这两种朋友都充满感激。

陪伴我探索的搭档包括达拉斯·坎贝尔（Dallas Campbell）、尼基·切尔斯卡（Nicki Czerska）、伊莲娜·切尔斯基（Irena Czerski）、路易斯·达特内尔（Lewis Dartnell）、塔米辛·爱德华（Tamsin Edwards）、坎贝尔·斯多里（Campbell Storey）和狗狗因卡（Inca）。

英国绿色中心（Green Britain Centre）的人们非常可爱，我参观过他们的风力发电机，他们热情而耐心地回答了我的所有问题。杰夫·威尔莫特（Geoff Willmott）博士和卡斯·诺克斯（Cath Noakes）教授分别在微流体设备和空气传播性疾病这两个问题上帮了我的大忙。

赫勒·尼科尔森（Helle Nicholson）、菲尔·赫克托（Phil Hector）和菲尔·里德（Phil Read）阅读了本书的部分内容，并提出了富有建设性的宝贵意见。马特·凯利（Matt Kelly）为本书的提案和各个章节提供了详细的反馈意见，他分享的经验让我在写作中受益匪浅。

在整个项目进行的过程中，马特的友谊和永不放弃的支持对我来说意义重大。汤姆·威尔斯（Tom Wells）鼓励我开始了本书的写作，他一直是我最耐心的试读者。杰姆·斯坦斯菲尔德（Jem Stansfield）、阿隆·沙哈（Alom Shaha）、盖亚·温斯（Gaia Vince）、阿罗克·吉哈（Alok Jha）、亚当·卢瑟福（Adam Rutherford）和科学界其他许多了不起的朋友为我带来了巨大的鼓励和无数欢笑。

多年以来，剑桥大学丘吉尔学院一直是我的智识家园，直到现在，它仍是我心中的家。丘吉尔学院和卡文迪许实验室使我受到了完整的物理学训练，在此我必须特别感谢我的研究导师戴夫·格林（Dave Green）博士。我希望这本书能够配得上他严格的标准，尤其盼望书中的语言能够弥补图表的缺失。丘吉尔学院的朋友在我的生命中占据着重要的地位，在探索的旅程中，能够遇到这么优秀而执着的同伴，这真是一件美好的事情。

我进入磁泡物理学的世界几乎完全出于偶然，斯克里普斯海洋研究所的格兰特·迪恩（Grant Deane）博士给了素未谋面的我一个机会，他为我提供了博士后的职位。格兰特既是一个了不起的人，又是一位热情而严格的学者，能有机会与他共事，我感到非常幸运。他让我看到了最优秀的学者应该具备的素质，也为我树立了最高标准的工作榜样。他为我提供了宝贵的机会，又无私地支持了我后面的项目，再多的语言也无法表达我的感激。

现在我就职于伦敦大学学院机械工程系，能得到这个工作机会，我感到无比幸运。我非常感谢系主任扬尼斯·温迪克斯（Yiannis Ventikos）教授，当我告诉他我要写这本书时，他表达了莫大的支持。马克·米奥多尼克（Mark Miodownik）教授永远精力充沛、待人温和，我必须感谢他的可靠建议和友谊，他为我找到了这么棒的学术家园，细思之下，我对他亏欠良多。

经纪人威尔·弗朗西斯（Will Francis）鼓励我写一本书，他以极大的耐性等待合适的时机，一路上还为我提供了无数支持和建议。在项目进行的过程中，环球出版社（Transworld）的苏珊娜·韦德森（Susanna Wadeson）一直是最可靠的舵手，我非常感谢她的洞察力和坦诚。

我的家人都很了不起，他们对世界充满好奇，永远跃跃欲试，随时准备尝试新事物。我的一切成就都离不开他们奠定的根基。我尤其要感谢妹妹伊莲娜（Irena），她和马尔科姆（Malcolm）是我认识的最好客、最可爱的人。听我的祖母帕特·乔利（Pat Jolly）、凯丝（Kath）姑妈和母亲讲述老式电视机和行输出变压器的秘密真是有趣的经历，我很后悔没有早几年听到这些。最重要的是，我要感谢我的父母——扬

（Jan）和苏珊（Susan）。他们教我探索世界，精益求精。我爱他们，再多语言也无法表达我对父母的感激。

[1] Tonic Water的音译，又叫奎宁水。——译者

[2] pH：氢离子浓度指数，法语中potentiel d’hydrogène的缩写。通常用来表示溶液的酸碱度。——译者

[3] 斯科特：罗伯特·福尔肯·斯科特（Robert Falcon Scott，1868—1912），英国海军军官，著名极地探险家。主要成就：发现并命名了爱德华七世半岛；带领探险队抵达南极点。1912年，斯科特不幸逝于南极大陆。——译者

[4] 罗伯特·波义耳（Robert Boyle）：罗伯特·波义耳（1627—1691），英国科学家，在物理学和化学领域都有重大贡献，其著作《怀疑派化学家》（The Skeptical Chemist）被人们称为近代化学的开山之作。——编者

[5] 罗伯特·胡克（1635—1703），英国科学家、博物学家、发明家。胡克是一位多才多艺的科学家，在很多领域都有重大贡献。——编者

[6] 雅克·查理（1746—1823），法国物理学家、数学家、发明家。——编者

[7] 我们将在第6章讨论绝对温度的含义。

[8] 现在我们并不鼓励用这样的方式来对待科学。

[9] 我们不知道奥托的真空泵到底抽出了多少空气。球内肯定达不到严格意义上的真空，但至少接近真空了。

[10] 呼吸也一样，你吸进肺里的每一口气都是靠气压差呼出去的。

[11] 不知道你有没有好奇过，托马斯小火车上为什么会有个“水罐”，答案当然是为了装水。蒸汽火车所需的水可以和煤一起存放在专门的车厢里，也可以直接装在发动机周围的水罐里。托马斯小火车采用的就是后面这种方式，所以它的蒸汽车头是长方形的。

[12] 当时，印度空中邮政协会（Indian Airmail Society）也尝试过用火箭送信。在270次飞行试验中，工作人员不光用火箭送信，还送过邮包，但始终无法建立起长期稳定的投递系统。最后人们得出结论，火箭邮政可靠性低、成本高昂，根本无法与常规的地面邮政竞争。

[13] 巧合的是，“泰坦尼克号”沉没的海域海水深度与船长之比（14倍）差不多等于葡萄干在2升装的瓶子里下沉的距离与葡萄干的长度之比（大粒的葡萄干长约2厘米，瓶子高约30厘米）。“泰坦尼克号”长269米，它最后沉到了3784米深的海底。

[14] 通常写作：力＝质量×加速度，即F＝ma。

[15] 你是否好奇过广义相对论讲的到底是什么？其实我们现在描述的就是这套理论的核心。如果你待在一个封闭的电梯里，无论是站在原地、玩接球游戏还是做仰卧起坐，你都无法分辨自己受到的力哪些来自重力，哪些来自电梯的加速度。爱因斯坦意识到，如果从这个角度来理解物质对太空的影响，那么你会发现所有力都一样，因为从本质上说，它们完全相同。

[16] 是的，我知道那个故事是假的，但理论是真的！

[17] 纳尼亚传奇》七部曲中的神奇大陆，通过一所乡下大宅的衣橱与现实世界相连。该系列作品由已故英国作家C.S.刘易斯于20世纪50年代创作，为英国儿童文学经典之一。——译者

[18] 如果你喜欢更严谨的说法，那么你可以称其为“角动量”。

[19] 后来玛丽亚还曾铐上手脚，蒙上眼睛，走钢索跨越瀑布。

[20] 鱼鳔带来了巨大的演化优势。与没有鱼鳔的水生动物相比，长着鱼鳔的鱼类停留在同样深度上需要耗费的能量更少。不过近年来，鱼鳔却又成了演化上的劣势，因为它们很容易被人类的声学设备探测出来。当今世界过度捕捞现象泛滥，“寻鱼器”就是人们使用的一种主要工具。这种声学设备可以探测气泡，再根据气泡找到鱼群。鱼群可能被一网打尽，这仅仅是因为气泡出卖了鱼的行踪。

[21] 俗称碳-60，碳原子组成的一种天然分子，其分子结构类似于美国建筑师富勒设计的某种圆顶，因而得名，也被称为富勒烯。——译者

[22] 碳纳米管又称巴基管，属富勒碳系，它是由单层或多层石墨片卷曲而成的无缝纳米级管。——译者

[23] 迈克尔·法拉第（Michael Faraday，1791—1867）是19世纪著名的实验家，他发明了许多实用的科学设备。1826年，法拉第在伦敦皇家研究院资助开设了一系列面向儿童的讲座，这项科普活动一直流传至今，这就是皇家研究院圣诞讲座。法拉第自己的科普课程由6次演讲组成，题为“一支蜡烛的化学史”。他在演讲中讨论了蜡烛的科学原理，并由此引出诸多重要而实用的科学定律。我敢打赌，要是法拉第知道烛焰里有纳米钻石，他铁定会大吃一惊，说不定还会大发感慨，看似简单的蜡烛竟藏着如许惊喜。

[24] 挑战者深渊（Challenger Deep）位于马里亚纳海沟最深处，它的深度是10994米。

[25] 南极海滨也有同样的现象。

[26] 如有冒犯，我诚挚地道歉。实际上我在本章中介绍的内容同样适用于速溶咖啡，所以你不必为了科学而浪费宝贵的高级咖啡。

[27] 出自美国作家约瑟夫·海勒（Joseph Heller）的长篇小说《第22条军规》（Catch-22），该小说中，根据第22条军规，只有疯子才能获准免于飞行，但必须由本人提出申请。同时又规定，凡能意识到飞行有危险而提出免飞申请的，属头脑清醒者，应继续执行飞行任务。第22条军规还规定，飞行员飞满25架次就能回国。但规定又强调，飞行员必须绝对服从命令，否则就不能回国。因此上级可以不断给飞行员增加飞行次数，而飞行员不得违抗。如此反复，永无休止。因此“第22条军规”多用来形容某事存在逻辑陷阱。——译者

[28] 蠹鱼（Lepisma saccharina），一种昆虫，又称蠹、衣鱼、壁鱼、书虫或衣虫，身体呈银灰色，因此也有白鱼之称。——译者

[29] 我们还能在微观世界畅游很久，而不必过于担忧量子力学的离奇世界。讨论单个原子和分子的行为时，你必须考虑量子力学，不过在这个层面以上，在肉眼可见的层面以下，仍有很多东西可供探索。实际上，夹在中间的这个层面相当有趣，因为它的运转规律符合我们的直觉（相比之下，量子世界里的很多事情看起来完全就不可思议），尽管你的肉眼看不到它。

[30] 我着迷于生活的丰富性与情趣，所以这个词总会让我有几分感伤。让所有东西变得一模一样，这样的操作自有其价值，但有时候，均质化仿佛夺走了生活中的所有乐趣，尤其是对蓝山雀而言。

[31] 这些新形成的小型脂肪球外面还包裹着一层蛋白质外壳，这又进一步延缓了它的上升速度。蛋白质外壳让脂肪球变得重了一点点，所以它的浮力比原来还小。人们通过各种手段详细测量了这个过程，一瓶牛奶里也有这么大学问，这实在令人震惊。

[32] 如果你有兴趣进一步了解这方面的知识，生物学家J.B.S.霍尔丹（J.B.S. Haldane，1892—1964）在20世纪20年代写过一篇著名的短文，题为《正确的尺度》（On Being the Right Size）。全文链接：http://irl.cs.ucla.edu/papers/right-size.html。这篇文章揭示了一个残酷的真相：重力基本不会给小鼠和更小的动物带来任何危险。你可以把一只小鼠丢进900米深的矿井里，只要矿井内的地面不算太硬，那么落地以后它最多会晕一小会儿，很快就能正常地跑开。如果发生同样的事情，大家鼠可能会送命，人类会骨折，马会摔得粉身碎骨。据我所知，谁也没有真正做过这个实验。你也千万不要去尝试。当然，要是你非去不可，请不要因此责怪我。

[33] 如果你不停地搅拌牛奶，奶油就永远都不会浮上来，因为搅拌会让奶油不断重新与牛奶融合。对液滴而言，道理完全一样——微粒不会下坠太多，因为气流的运动速度大于它们坠落的速度，这会让它们重新融入空气。

[34] 对我来说更是如此，归根结底，我是专门研究气泡的物理学家。

[35] 把水滴到某种疏水性较强的物体（比如光滑的西红柿）上，你也能看到这种效应。西红柿皮上的水会凝聚成水珠，尽量减小自己与西红柿接触的面积。这时候只要用一根蘸了洗涤剂的牙签轻轻一戳，水珠就会立即扩散成膜。当然，做完这个实验以后，我希望你在吃这颗西红柿之前好好把它洗一洗。

[36] 固体表面对水分子的吸引力等于水分子内部的引力——只要能达到这样的平衡，就能解决所有同类问题。对于英国人来说，最大的麻烦是，在快倒完茶时，有些茶水会顺着壶身向下流到桌子上，而不是流进杯子里。这是因为这些茶壶的亲水性太强了。随着水流速度减慢，壶嘴的吸引力逐渐超过了推动茶水向前流动的冲力。要解决这个问题，你可以换个疏水性强的茶壶，遗憾的是，在我写作本书的时候，这样的产品似乎还没有问世。

[37] 实际上，我是想表达歉意。之前去克拉科夫的时候，我曾答应请大家去犹太区吃顿大餐，可是那年头没有智能手机，我不幸迷路了。我领着12个饥肠辘辘的伙伴像没头苍蝇一样在黑暗空旷的街上穿梭，一路上连一家餐馆都没看到，传说中的大餐更是不见踪影。最后，我们不得不找了家麦当劳随便解决了一顿。我觉得做个苹果派至少能弥补我的部分过失。

[38] 当然，牛奶里的脂肪、蛋白质和糖不会蒸发，所以你依然需要清洗毛巾上的残余物。

[39] 西敏寺钟塔（大本钟所在的钟塔）高96米，你不难想象那些红杉到底有多么宏伟。

[40] 纳米真的是一个非常非常小的单位——要知道，1毫米等于1000000纳米。

[41] 但这种效应也有限制。要增加表面张力，把水抽得更高，你就必须让气孔变得更小。气孔缩小无疑会影响树叶吸收二氧化碳的效率，光合作用得到的原材料也会减少。从理论上说，树木生长的极限高度是130米，一旦超过这个高度，它就无法得到足够的二氧化碳，自然也就不能继续长高了。

[42] 还有一些证据表明，雾或许还有其他作用。除了预防蒸发以外，雾气还会直接渗入气孔，为树叶补水。

[43] 这类设备有个拗口的名字：微流控纸基电化学装置（microfluidic paper-based electrochemical device），简称“μPAD”。一家名叫全民诊疗（Diagnostics for All）的非营利性组织正试图将μPAD推广到临床实用领域。

[44] 这种现象被称为“剪切稀化”，很快我们就将看到，蜗牛也会利用这种现象。

[45] 当然，还有第三种可能：堆肥里藏着蜗牛卵或者小蜗牛，它就是在托盘里孵化长大的。但那只蜗牛真的很大，我实在无法想象它能在短短几周内长这么大。

[46] 弗罗斯特的论文中提到了一件趣事。一般来说，我不会为了喜剧效果而引用科学论文，但是现在，我必须和大家分享这段话：给一只鸟儿拍完视频片段后，我们本来打算把跑步机关掉，却不小心把它调到了极慢的速度。片刻之后，我们发现那只鸽子的头开始慢慢前倾，角度越来越大，最后它果然摔倒了。进一步的观察表明，如果跑步机以极慢的速度运转，鸽子也会摔倒，或者说它的姿态会出现极端的变化。看起来，这样慢的速度不足以让鸽子迈步前进，却会让它不自觉地试图调整头部位置，有时候会导致它失去平衡。

[47] 刚刚搬到美国西南部的时候，我总是忍不住好奇地念叨，想知道在这么干旱的地方，水到底是从哪儿来的。马克·赖斯纳（Marc Reisner）的著作《凯迪拉克沙漠》（Cadillac Desert）解答了我这方面的很多问题，也讲述了本地供水之战背后的精彩故事，我非常推崇这本书。就在我写下这段话的时候，加利福尼亚州的旱灾正在肆虐，要解决这个问题，我们必须做出一些艰难的决策，这件事刻不容缓。

[48] 实际上还有个办法：改喝卡布其诺。液体上方的泡沫层会有效抑制水面的晃动，所以带有泡沫的饮品更不容易洒。同样的道理也适用于酒吧。啤酒鉴赏家们或许不喜欢太厚的泡沫，但至少泡沫能预防杯子里的酒洒出来。

[49] 此数据已经过时，目前全球最高的大楼是828米的迪拜哈里发塔，但这个数据更新极快，随时可能变化。——译者

[50] 巨大的金球下方还有两个较小的副摆，可以辅助它完成职责。

[51] 我在海边还有个意外发现：要是你想跟鸟类爱好者搭讪，不妨随口问问他们海鸥的事情。鸥是个庞大的家族，其中部分物种生活在海里或者海边，但实际上没有任何一种鸟儿名叫“海鸥”。真正的鸟类爱好者要么花好几个小时来跟你解释这件事，要么干脆对你嗤之以鼻。

[52] 如果有机会从侧面观察，你会发现它们实际上是在海面上绕小圈。重点在于，海鸟不会真的跟着海浪移动。

[53] 太平洋的其他岛民（尤其是大溪地人）也有冲浪板。不过，那块小小的板子似乎只是他们在水上坐卧的工具。夏威夷人率先想出了站在板子上迎风破浪的运动方式，也就是今天我们熟知的“冲浪”。

[54] 光属于波的特性显而易见。人们设计了一个巧妙的实验来测量地球绕日公转轨道，并由此揭示了光最反直觉的一种特性：光波中没有任何波动的“物质”。它实际上是在电磁场中传播的一种扰动。这个实验名叫迈克尔逊-莫雷实验（Michelson-Morley experiment），它一直是我最爱的科学实验，因为它的设计者以简洁而优雅的方式利用整颗行星验证了一个假说。

[55] 某些孩子身边的文化氛围里没有“蓝色的水”这个概念，观察他们选择什么颜色的蜡笔是一件十分有趣的事情。我觉得，我们之所以会觉得水是蓝色的，是因为我们看到过蓝色的大海、地球的卫星照片和清澈见底的游泳池。但某些文化中的人此前一直没见过这些东西，那么他们的孩子会下意识地觉得水就是蓝色的，还是说这完全是一种习得的知识？

[56] 光波往往仅指可见光，但为了方便读者理解概念，作者将红外线、紫外线和可见光放在一起讲解。同样为方便读者理解概念，下文还会将无线电波和光波相提并论。因此，下文中出现的光波大多指包括可见光在内的、跨越整个频谱的多种电磁波。——编者

[57] 不过，天文学家有时候并不相信自己接收到的信号真的来自辽阔的宇宙。1964年，罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）和阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）从天空中探测到了不应出现的一种微波。他们花了很长时间试图弄清到底是天空中有异常情况还是望远镜出了故障，这些神秘的微波信号总该有个来源。他们甚至清理了望远镜里的鸽子和鸽粪（他们在论文中委婉地称之为“白色绝缘材料”）。无论如何，这些神秘的背景光似乎都无处不在。最后人们发现，它是大爆炸留下的余韵，也是宇宙中最古老的光。要分辨信号到底来自鸽子的粪便还是宇宙的起源，你得非常小心地通过实验去证明。

[58] 这和真正的温室没有太大关联。

[59] 每个基站覆盖的区域都被称作一个“蜂窝”，正是出于这个原因，手机在美式英语里又叫“蜂窝电话”（cellphone）——因为它的网络是蜂窝状的。

[60] 离子是原子得到或失去电子后形成的微粒。在这里，钠原子给了氯原子一个电子，变成带正电的钠离子；与此同时，氯原子变成负离子。听起来似乎有些不合常理，但现在它们携带不同的电荷，所以二者会互相吸引。

[61] 冰块浸没在水面下的体积正好等于它融化后产生的水所占的体积，这个现象完全可以用浮力定律来解释。无论冰块占据的“洞”里填充的是水还是冰，杯子里剩余的水都必须托起它的重量。只要这个洞的体积不变，那么洞里装的是什么东西根本无关紧要。冰块填在洞里的时候，多余的体积会被排除在外，也就是露出水面的那个部分。

[62] 以这种工艺制作的玻璃被称为“冕玻璃”，你也许好奇过这个名字的来历。很多古老的酒吧窗玻璃中央都有一个圆形斑点，那是铁棍留下的痕迹。靠近中央的玻璃是最便宜的，因为它的厚度很不均匀。当然，今非昔比，现在这样的“特质”已经身价百倍。正如我的北方亲戚们所说：“你在高级餐厅里还得为这些东西多付一笔钱。”当然，在我们提到的高端酒吧里也是一样。

[63] 这里用到的其实是我们在第1章中介绍的气体定律，冰箱通过

控制气体的膨胀和收缩来影响它的温度。冰箱里有台发动机，可以推动制冷剂在连通内外的回路中流动。首先，液体膨胀，温度降低。低温液体通过背面的管路进入冰箱内部，在这里，液体吸收热量，冷却冰箱里的空气。然后，这些液体重新回到冰箱外，压缩升温。多余的热量散发到空气中，然后液体再次膨胀，循环重新开始。

[64] 我敢打赌，对于以下两个问题，每一位比萨爱好者都有自己的答案：什么样的比萨面团才算最好？我们应该怎么给它塑形？我只能说，根据我个人的体验，这家餐馆出品的比萨真的很棒。不过，要是你不同意这位厨师的意见，请不要写信给我表达抗议！

[65] 2005年，国家测绘局公布了中国珠峰高度测量的结果：珠峰峰顶岩石面海拔高度为8844.43米，精度为±0.21米，峰顶冰雪厚度为3.50米，峰顶位于中国。而8848米为总高度（包括雪盖高度）。——译者

[66] 不过也有例外，如果液滴的体积很小——真的非常非常小——那么表面张力会让它凝聚成团。

[67] 你觉得这件事我耿耿于怀了十多年？其实没有那么严重啦……你为什么会产生这种想法？

[68] “伴侣号”的公转轨道是椭圆形的，所以它的离地高度是223~950千米，与此同时，它承受的重力是地面上的76%~93%。

[69] 为了家庭和谐，做实验的时候最好就别涂黄油了。如果你觉得必须尽量逼真，那么至少在地板上垫几张报纸，或者其他类似的东西。这时候你就会发现，无纸化时代也有坏处，你可以用高科技的平板电脑看新闻，却不能把它当成桌布来用。

[70] 你或许很想知道，为什么投石车吊兜里的长靴就能停止旋转笔直地向前飞行，面包片却会一直转动。二者的不同之处在于，面包片是被内部力量凝聚在一起的单个物体，所以作为一个整体，它的角动量是守恒的。如果有一部分面包片离开了整体（比如脱落了一小块），那么脱落的这部分会沿直线运动。

[71] 我说的选择并不包括把面包片做成火柴盒大小或者改在特别矮的咖啡桌上吃早餐。

[72] 扔硬币的美妙之处在于，它飞行的轨迹和转动的速度是两个独立的参数。无论硬币转还是不转，它都有可能划出同样的弧线。但只要你投掷硬币的手法正确，它就会一边旋转一边运动。质心的运动和硬币本身的旋转各不相关，互不干扰。

[73] 实际上，在引力的作用下，地球自转和公转的关系要更加复杂一点，但基本的原理就是这样。如果你有兴趣进一步了解，请查阅“米兰科维奇循环”（Milankovitch cycles）。

[74] 虽然地球自诞生以来就一直在旋转，但由于月球引力的轻微作用，地球的自转正在以微不可察的速度变慢。这样的变化非常细微。每过100年，地球上的一天就会延长约1.4毫秒。为了弥补这个误差，每隔几年我们就要在一年里增加1闰秒。

[75] 新的硬币也要略厚一点，因为它的重量和旧币完全相同（同质量的钢体积要比铜大一点点）。正是这个原因，铸币厂更改了硬币的制造材料以后，所有自动贩卖机都必须进行相应的改造——相同质量的不同金属占据的空间是不同的。自动贩卖机也会检查硬币的磁性是否符合它的面值和种类。

[76] 我不开玩笑，他们对此真的很自豪。在罗得岛州，哪怕是那些自称素食者的年轻女孩也照样会吃海螺沙拉，虽然据我观察，这道名菜的主要原料是巨大的海洋软体动物和大蒜。

[77] 有时候电子会发生转移，不同的原子核可以共享同一批电子，分子就是这样形成的：共享电子带来的引力拉近了原子核之间的距离，不同的原子由此形成一个分子。正负电荷之间的引力让原子和分子凝聚成形。有时候电子会在不同的分子之间来回运动，改变原子核结合的对象和模式，这个过程我们称为“化学反应”。化学研究的正是电子之舞和这奇妙的舞蹈带来的美妙的复杂性。

[78] 蜜蜂的故事还有个转折。2013年，布里斯托尔大学的研究者

发现，每一朵花都携带着少量负电荷，一旦蜜蜂降落在花朵上，二者携带的静电就会相互抵消。他们演示了蜜蜂无须降落就能分辨出哪些花朵带负电、哪些不带。研究者提出，蜜蜂或许不会青睐那些不带电的花朵，因为这意味着之前有其他蜜蜂来过。

[79] 你家里的电热器正是基于这个原理。我们迫使电子流经强电阻材料，将它们携带的电能转化为热能。其他任何能量转换过程都有损耗，因为必然有一部分能量会转化为热能。但如果你需要的是热能，那么能量的利用效率就能达到100%……真是太完美了！

[80] 有些刻板的老学究或许会说，现在我们已经发现了超导材料。是的，超导体的确存在，但将物体冷却到接近绝对零度需要消耗巨大的能量，同时产生巨量的热。所以，如果你追求的是能量的利用效率，超导材料其实帮不上什么忙。

[81] 不同国家和地区的民宅供电会有所差别，欧洲很多地方的民宅供电为230伏。在中国，这个数字是220伏。——编者

[82] 也就是每秒循环50次——所以我们说英国主电网的额定频率是50赫兹。

[83] 写给爱好细节的读者：转换器的工作流程分为三步。第一步，它把230V的电压转化为20V左右，即笔记本电脑的工作电压。第二步，转换器把电流的每一次循环切割成两半，截出方向一致的电流。第三步则是对电流进行平滑处理，让它变得像电池输出的直流电一样稳定。

[84] 这是一家以电子技术为核心的老牌企业，主要业务涉及录音和播放技术。后来，EMI发展出了一个极有影响力的音乐品牌，也就是我们熟知的“百代唱片”。——编者

[85] 这个发现引起了轰动。在此之前，物理学家已经在组成宇宙的粒子之中探测到了一种模型，粒子物理学界称为“标准模型”。但这种模型成立的前提是宇宙中存在一种非常特殊的粒子：希格斯玻色子。人类花了数十年时间来寻找希格斯玻色子，2012年的发现极大地增强了我们对现有理论的信心。

[86]　　或者跑道两头分别标出两个数字，二者之间相差18（比如09-27）。因为飞机可以从跑道的任意一头起飞或着陆，不过显然，根据你选择的方向不同，机头的角度自然会相差180度。

[87] 同时代的加拿大人劳伦斯·莫利也曾提出过同样的想法，但他的论文因为“荒谬可笑”而被期刊退稿了。

[88] 人们常说，大西洋变宽的速度和你的指甲生长的速度差不多。

[89] 不太冷也不太热，温度刚刚好的区域。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划




未讀

140亿年宇宙演化全史

ORIGINS

FOURTEEN BILLION YEARS OF COSMIC EVOLUTION

《给忙碌者的天体物理学》扩容增强版

NEIL DEGRASSE TYSON
DONALD GOLDSMITH

［美］尼尔·德格拉斯·泰森 ［美］唐纳德·戈德史密斯——著

阳曦——译 郑捷——审





献给仰望星空的人 & 还不知道为什么应该仰望星空的人

新卡尔·萨根
“摇滚”天文学家
尼尔·德格拉斯·泰森——**经典力作**



胜过太多乏味的
天文学文本
真正引领你认识宇宙的——**启蒙之书**

版权信息

140亿年宇宙演化全史

Origins Fourteen Billion Years of Cosmic Evolution

作者：[美]尼尔·德格拉斯·泰森（Neil deGrasse Tyson） [美]唐纳德·戈德史密斯（Donald Goldsmith）

译者：阳曦

审校：郑捷

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

版权信息
前言　思考科学的起源和起源的科学
序曲　有史以来最伟大的故事
卷一　宇宙的起源
　第一章　开始的开始
　第二章　反物质的重要性
　第三章　要有光
　第四章　要有暗
　第五章　要有更多暗
　第六章　一个宇宙还是多个宇宙
卷二　星系和宇宙结构的起源
　第七章　发现星系
　第八章　结构的起源
卷三　恒星的起源
　第九章　尘归尘
　第十章　元素动物园
卷四　行星的起源
　第十一章　行星的青春年代
　第十二章　行星之间
　第十三章　无数个世界：太阳系外的行星
卷五　生命的起源
　第十四章　宇宙中的生命
　第十五章　地球生命起源
　第十六章　在太阳系中寻找生命
　第十七章　在银河系中寻找生命
尾声　在宇宙中寻找我们自己
致谢
术语表
返回总目录

献给仰望星空的人

和那些还不知道为什么应该仰望星空的人

前言　思考科学的起源和起源的科学

科学知识的一些新综合学科正在不断发展壮大。近年来，天体物理学已经不再是宇宙起源相关问题唯一的答案来源。随着天体化学、天体生物学、天体粒子物理学等新兴学科的涌现，天体物理学家发现，学科的交叉与融合能为他们带来莫大的益处。我们到底从哪里来？要回答这一问题，我们需要调用多门学科的知识，研究者审视宇宙运作机制的视角也会因此达到前所未有的广度和深度。

在本书中，我们向读者介绍了这些新的综合学科；由此，我们不仅讨论了宇宙的起源，还谈到了最大的物质结构的起源、点亮宇宙的恒星的起源、生命摇篮行星的起源，以及生命在某颗或多颗行星上的起源。

人类对起源问题特别感兴趣，这背后既有理性方面的原因，也有情感方面的原因。若是不知道某样东西的来源，我们很难理解它的本质，而在我们听说过的所有故事中，那些讲述“我们从哪里来”的故事总能引起我们最深的共鸣。

演化将自我中心的思考方式刻进了我们的骨头里，再加上百万年来在地球上的生活经验，在重述大多数起源故事的时候，我们自然会特别注意与自己息息相关的事件和现象。但是，对宇宙的认识越深入，我们就越清楚地发现：我们生活的星球不过是宇宙中的一粒尘埃。整个宇宙有数百亿个星系，银河系只是其中之一，我们的地球所围绕运行的太阳，也只是银河系边缘一颗再普通不过的恒星。我们在宇宙中的卑微地位激发了人类天性中强烈的防御机制。很多人不知不觉变成了动画片里的那种角色。他们仰望灿烂的星空，然后告诉同伴：“当我看着这些星星的时候，它们的微不足道令我感慨。”

纵观历史，不同的文化各有自己的创世神话。这些故事解释了宇宙的力量如何塑造我们的命运，这有助于我们对抗自感卑微的痛苦心理。虽然这些起源故事通常有一个宏大的开篇，但故事的情节很快就会转移到地面上；宇宙和宇宙中所有物质的诞生、地球生命的起源等常被一笔带过，接下来的长篇大论只讲述人类历史的种种细节和社会冲突，仿佛整个世界是以我们为中心创造出来的。

几乎所有的创世神话都有一个默认的前提：宇宙的运行有其基本规则。而这些规则，至少从理论上说，会在我们对周围世界的审慎观察中显露。古希腊哲学家甚至将这样的前提升华到了崇高的地步，他们坚称，我们人类有能力感知自然运作的机制，透过现象看到事物的本质，并从中提炼出主宰万事万物的基本真理。他们还坚称，揭开这样的真理

非常困难——这倒是可以理解的。早在2300年前，希腊哲学家柏拉图就将求知者比作洞穴里的囚徒，他们看不到背后的东西，只能靠洞壁上的投影来推测真理的面貌。这个著名的比喻深刻地反映了人类的无知。

柏拉图的比喻不仅精妙地总结了人类为理解宇宙付出的努力，还强调了这一点：我们天生容易相信某些能被我们模糊感觉到的神秘实体在主宰着宇宙，我们最多只能学到一部分属于它们的知识。从柏拉图到释迦牟尼，从假想的宇宙创造者到电影《黑客帝国》里的“矩阵”，人们总是深深相信，宇宙由某种更高级的力量主宰着，真正的主宰者可以一眼看穿表象，看透万物的本质。

从500年前开始，一种理解自然的新方法渐渐成形。新技术和新技术带来的发现孕育了新的态度，今天的我们称之为“科学”。纸质书在欧洲的流通，加上水路和陆路交通的改善，让人与人的交流和沟通变得更加快捷高效，所以人们才能以远超往昔的速度学习别人的理论，彼此砥砺切磋。从16世纪到17世纪，高效的讨论催生了一种获取知识的新方法，它的核心原则在于，要想最有效地理解宇宙，首先人们必须仔细观测，然后尝试提出一些基本的通用理论，试着解释这一系列的观测结果。

另一个概念也促成了科学的诞生。科学依赖于有理有据的怀疑精神，也就是说，科学总是需要人们有条理地提出质疑。很少有人愿意质疑自己的结论，所以要鼓励科学的怀疑精神，我们必须奖励那些敢于质疑他人的人。这种做法或许有悖人性——不是因为它号召大家质疑别人的想法，而是因为，只要你能证明另一位科学家的结论错了，你就能得到鼓励和奖赏。对其他科学家来说，这位纠正了同行错误的人，或者以严密的理由对同行的结论提出质疑的人，他做的事情十分高尚，就像禅宗大师用一记耳光唤醒了在冥想中走火入魔的新手，只不过这些互相纠正的科学家通常是平等的，这里没有师徒。通过奖赏发现他人错误的科学家——人类天性如此，挑别人的错比挑自己的错简单得多——科学家群体建立了一套能够自我纠正的强大系统。科学家不会放过证伪同行理论的机会，却也支持彼此为拓展人类知识所做出的尝试，他们由此创造出了用于理解自然最有效、最高效的工具。科学因此成为一种共同追求，然而科学家绝不是一个惺惺相惜、互吹互擂的团体，他们也不应该是。

和人类发展过程中的所有尝试一样，科学方法在实际运作中也没有理论上那么顺畅。并不是所有科学家都会充分地怀疑同行。总有人希望在位高权重的科学家面前多露露脸，有时候也有人会被知识以外的因素左右，这都会影响科学的自我纠正能力。不过从长期来看，错误早晚会得到纠正，因为总有别的科学家会发现它，为了自己的职业前途着想，他们肯定会对此大肆宣扬。只有那些经受了其他科学家的质疑和攻击仍屹立不倒的结论才有资格成为科学“定律”，人们会将它们纳入对现实的有效描述。不过科学家深知，也许未来某天我们又会发现，这些定律其实是某个更宏大、更深刻的真理的一部分。

不过，证明彼此的谬误并不是科学家的主要工作。用略微不同的观测结果来验证种种不完善的假设，这才是他们花费大部分精力去做的正经事。然而每隔一段时间，某个重要理论就会出现一个意义重大的新观点，或者突然冒出来一整套新的观测结果，科学家又会提出一系列新假设来解释这些结果（这种情况在技术进步的年代更常见）。在某个伟大的时刻，某个新解释（或许还有新的观测结果）彻底改变了我们对自然的看法，这样的事情不绝于史，未来也必将再次发生。科学的进步由两类人推动：那些设法获取更好的数据，并根据数据小心推理的人，还有那些冒着极高的风险挑战已被广泛接受的结论的人——当然，一旦成功，他们也将得到极高的收益。

怀疑主义是科学精神的核心，但人类的心智天生倾向于逃避冲突，蜷缩在看似永恒的真理带来的安全幻境中。如果科学的方法不过是对宇宙的另一种诠释，那它永远不会激起太大的波澜，但科学之所以能够大获成功，是因为它真的管用。如果你乘坐一架根据科学规则（这些规则经受了数不清的试图证明其谬误的考验）制造的飞机，那么你安全到达目的地的概率远大于乘坐基于吠陀占星术规则制造的飞机。

纵观近代史，看到科学成功地解释了自然现象，人们的反应不外乎四种。首先，一小部分人真心实意地认为科学是我们理解自然的最好办法，他们不打算寻求其他诠释宇宙的方式。第二种人比第一种人多得多，他们对待科学的策略是无视，这些人觉得科学无趣、晦涩或者不符合人类天性［这些人看起电视来如饥似渴，他们从不会停下来思考，电视的图像和声音来自何方，更不会想到“魔法”（magic）和“机器”（machine）这两个词系出同源］。第三种人也是少数派，他们意识到了科学与自己珍视的信念之间的冲突，所以他们积极地想要证伪那些冒犯或触怒自己的科学结论。不过这样的人对科学基本一窍不通，不信的话，你可以问他们：“你觉得什么样的证据才能让你相信自己是错的？”1611年，面对现代科学结出的第一批硕果，诗人约翰·多恩（John Donne）写下了一首《世界的剖析：第一周年》（*The Anatomy of the World: The First Anniversary*）来表达自己的震撼。直到21世纪的今天，这些反科学分子还能体会到多恩当时的感受：

而新的哲学令人生疑，

火元素已被扑灭，

太阳迷失了，大地也不见踪影，谁的智慧

也无法带领他去找到它们。

有人直率地承认，这个世界完蛋了，

在行星中，在苍穹中，

他们正在探寻那么多新的东西；他们看到，这个（世界）

再次崩塌成原子。

万物粉碎，所有连贯性消失……

第四种人倒是为数不少，他们一方面接受科学对自然的解释，但从另一方面来说，他们依然相信，宇宙的主宰是一种我们无法完全理解的超自然的存在。哲学家巴鲁赫·斯宾诺莎（Baruch Spinoza）搭建了自然与超自然之间最强有力的桥梁，他拒绝承认自然和神有界限，并坚持认为宇宙既是自然的，也是神性的。其他传统宗教的徒子徒孙倒是常常强调二者之间的分野，他们更愿意从心理上划分自然和超自然掌管的领域，通过这种方法来调和二者。

无论属于哪个阵营，至少谁也不会怀疑，现在是我们学习宇宙新知识的大好时机。那么我们不妨踏上探索宇宙起源的冒险征途，像侦探一样根据现场留下的证据来推测犯罪事实。我们邀请你一起寻找宇宙的线索——探索这些线索隐藏的意义——或许我们终将发现，宇宙的一部分如何演化成了我们自己。

序曲　有史以来最伟大的故事

这个世界业已运转多年，所有动作早已设定妥当。

从那以后，一切如常运转。

——卢克莱修（Lucretius）

大约140亿年前，在那时间的开端，已知宇宙中所有的空间、物质和能量都挤在针尖大的一个小点里。然后宇宙突然变得灼热滚烫，描述宇宙的基本力开始浮现，那是一种单一的力。宇宙温度高达10^{30}摄氏度，这时候它刚刚诞生了10^{-43}秒。在这样的时刻，我们所有关于物质和空间的理论都失去了意义。在这个统一的力场里，能量激荡，黑洞诞生然后消失，随后再次成形。在这样极端的条件下，根据公认的物理学推论，时间和空间的结构发生了严重的弯曲，时空咕噜噜地形成了多孔的海绵状结构。在这个阶段，谁也分不清哪些现象遵循阿尔伯特·爱因斯坦（Albert Einstein）的广义相对论（现代引力理论），哪些又符合量子理论（对微观物质的描述）。

随着宇宙继续膨胀冷却，引力开始和其他力分离。又过了没多久，强核力和电弱力分道扬镳，与此同时，海量的能量向外释放，宇宙的体积也因此在极短的时间内膨胀了10^{50}倍。这个被称为“暴胀时期”（epoch of inflation）的阶段抹平了宇宙中的物质和能量，从此以后，宇宙相邻部分的密度差降低到了十万分之一以下。

接下来，宇宙的膨胀进入了经过实验室验证的物理学范畴。宇宙的温度依然很高，足以让光子自发地将能量转化为物质-反物质粒子对，紧接着这样的粒子对又会彼此湮灭，将能量返还给光子。出于某些未知的原因，之前基本力分离的时候，物质和反物质的对称性被“打破”了，结果宇宙中的物质比反物质多出来了一点。这样轻微的不平衡对宇宙未来的演化至关重要：每诞生10亿个反物质粒子，相应地就会出现10亿零1个物质粒子。

随着宇宙进一步冷却，电弱力又分裂成了电磁力和弱核力，我们熟悉的四种基本力就此成形。这一大锅“光子汤”的能量继续降低，现在，光子不能继续自发生成物质-反物质粒子对了，残存的粒子对迅速湮灭，最后留下一个这样的宇宙：每10亿个光子产生1个普通的物质粒子——没有反物质。如果没有这种不平衡的情况，那么持续膨胀的宇宙里除了

光以外不会有其他任何东西，更别提什么天体物理学家了。在大约3分钟的时间里，物质粒子变成了质子和中子，大量质子和中子又进一步结合成最简单的原子核。与此同时，自由运动的电子让光子不停地来回散射，创造出一大锅不透明的物质和能量汤。

等到宇宙的温度降低到几千K（开氏度）以下（这还是比鼓风炉热得多），某些运动速度太慢的自由电子开始被流动的原子核捕获，形成氢、氦、锂的完整原子，这是三种最轻的元素。现在宇宙（第一次）变成了透明的，可见光和我们今天观察到的宇宙微波背景辐射（它们也是自由飞翔的光子）开始展露身形。创世之初的10亿年里，宇宙继续膨胀冷却，物质在引力作用下聚集形成星系。仅仅在我们可见的宇宙范围内，就有1000亿个星系聚集成形，每个星系都包含着几千亿颗恒星，热核反应就发生在恒星核内部。如果一颗恒星的质量能达到太阳的10倍左右，那么它的压力和温度就足以达到临界值，恒星核内就会开始生成数十种比氢更重的元素，其中包括组成行星和生命的关键元素。很长一段时间里，这些元素都会被困在恒星内部，无法发挥作用。不过，等到大质量恒星死亡以后，富含各种化学元素的恒星核物质就会通过爆炸散落到整个星系中。

经历了七八十亿年的富集以后，在宇宙某个普通角落（室女座超星系团边缘）的普通星系（银河系）的普通区域（猎户座旋臂）里，一颗普通的恒星（太阳）诞生了。孕育太阳的气团中含有丰富的重元素，足以形成几颗行星、几千颗小行星和几十亿颗彗星。在这个行星系形成的过程中，围绕太阳旋转的“母亲气团”开始分离出一团团密集的物质。几亿年的时光里，彗星和其他碎片常常高速撞击这些岩石行星崎岖的表面，留下沸腾的岩坑。随着太阳系中的自由物质不断减少，行星表面开始冷却，被我们称为地球的行星就这样诞生了，它所在的轨道正好可以允许大气层内存在液态的海洋。如果地球轨道离太阳更近一些，海洋就会被蒸发，而要是地球轨道离太阳再远一些，海洋就会结冰。无论是哪种情况，地球上都不可能演化出我们今天所知的生命。

在化学元素丰富的海洋里，出于某种我们尚不清楚的机制，刚刚出现的简单厌氧菌不知不觉地将地球上富含二氧化碳的大气转化成了氧气含量充足的空气，需氧生物开始形成、演化，最终统治了海洋和陆地。氧原子通常成对组成分子（氧气，O_2），不过在上层大气中，它们也会形成包含3个原子的分子（臭氧，O_3）；臭氧能保护地球表面免遭紫外线光子的侵扰，这种微粒可能造成分子级的破坏。

生命之所以如此丰富多彩，是因为宇宙中富含碳元素，碳元素能组成的分子多不胜数，其中有简单的也有复杂的；碳基分子的种类比其他所有分子加起来还多。但生命又是脆弱的。地球经常遭到太阳系成形时期残余下来的大块天体的撞击，这本是司空见惯的事情，不过在生命诞生以后，地球上的生态系统却会因为这样的撞击而迎来浩劫。远的不说，就在6500万年前（如果地球是一位百岁老人，那么这件事距离现在还不足两年），一颗10万亿吨重的小行星击中了如今的尤卡坦半岛，地

球上超过70%的陆生动植物群落就此灭绝，其中包括那个年代的陆地霸主——恐龙。这场生态灾难也带来了一个契机，体形更小、生存能力更强的哺乳动物很快填补了生态链的新空白。而在这些哺乳动物中，脑袋特别大的灵长目最终演化出了一个特殊的物种——智人（*Homo sapiens*）——极高的智力水平让他们得以发明科学的方法和工具，进而发展出天体物理学，最终开始探索宇宙的起源和演化。

是的，这个宇宙的确有一个起点。是的，这个宇宙还在不断演化。是的，我们体内的每一个原子都可以追溯到大爆炸的那一刻，它们在大质量恒星的热核熔炉之中诞生。我们不光生活在这个宇宙中，我们还是这个宇宙的一部分，是它孕育了我们。你甚至可以说，虽然我们的地球不过是宇宙中一个小小的角落，但就是在这里，宇宙赋予了我们力量，让我们去探索它的起源和奥秘。现在，我们才刚刚开始。

卷一

宇宙的起源

第一章　开始的开始

开始的开始，就有物理。“物理”描述的是物质、能量、空间和时间的行为。在那恢宏的宇宙舞台上，这些角色的互动创造了所有的生物学和化学现象。物理定律也因此成了我们这些凡人所熟悉的一切基本事物的源泉和根基。科学家在解释天文现象时用到的物理定律来自物理学中尺度较大的那个部分，我们称之为“天体物理学”。

无论在哪个科研领域，最前沿的发现都需要我们在极端环境中观测现象及其条件，物理学尤其如此。某些环境的极端性体现在物质方面，比如说在黑洞附近，引力会严重扭曲周围的时空连续性；另一些环境的极端性则体现在能量方面，例如，恒星核心1500万摄氏度的高温环境中会产生自发的热核聚变反应。宇宙诞生之初那几个短暂的瞬间凝聚了我们能想象到的所有高温、高密度的极端条件。要理解这几个瞬间分别发生了什么事情，我们需要借助人类进入20世纪以后发现的一些物理定律。物理学的这部分内容被学界定义为“现代物理学”，以区别于此前的“经典物理学”。

经典物理的一大特征在于，如果你停下来仔细思考，你会发现它阐述的事件、定律和预测都很有道理。物理学家在普通的建筑物里利用普通的实验室设备发现并验证了这些经典的规则。直到今天，我们还在高中物理课堂上学习经典物理学描述下的引力、运动、电磁，以及热能。经典物理学定律揭示了自然世界背后的规律，并由此推动了工业革命。这门学科以前几代人根本无法想象的方式彻底改变了我们的社会和文化，直到现在，经典物理学仍是我们理解日常经验世界的核心工具。

与此相对，现代物理学看起来就显得很不合理，因为它描述的现象都发生在人类感官无法触及的遥远领域里。这其实是件好事。正因如此，我们才能高高兴兴地生活在熟悉的日常世界里，完全不受极端条件下的“怪异物理”影响。一个普通的早晨，你起床，在屋子里转两圈，吃点东西，然后走出家门；到了黄昏时分，你挚爱的人肯定希望回到家里的你和早上出门时一模一样，全须全尾。我们不妨想象一下，如果你来到办公室，走进一间温度极高的会议室，准备参加上午10点的一场重要会议，就在这时候，你突然失去了所有电子，甚至更严重，组成你身体的原子突然纷飞四散，这可就糟了。或者，你坐在办公室里，借着头顶那盏75瓦台灯的光线打算干点活，突然有人打开了一盏500瓦的灯，于是你的身体开始在几堵墙壁之间弹来弹去，最后像恶作剧玩偶盒里的玩偶一样从窗户飞了出去。又或者，你下班后去看相扑比赛，结果只看到两位体形近乎圆球的选手相互碰撞并消失，他们自然而然地变成了两束

光，从相反方向离开房间——看到这一幕，你感觉如何？又或者，你在回家的路上挑了一条不太挤的路，结果一幢黑漆漆的大楼先是把你的脚吸了进去，然后又把你的身体拉伸成了一根“面条”；你艰难地穿过一个洞口，身体被压成一张薄片，从此以后，再也没有人见过你或者听到你的消息。

如果这些场景真的出现在我们的日常生活中，我们或许会觉得现代物理其实没有那么奇怪；有了日常的生活经验打底，我们就能顺理成章地理解相对论和量子力学的基础知识，而我们的爱人恐怕永远不会放我们出门去上班了。但在宇宙诞生之初的那几分钟里，这样的事情随时随地都在发生。要尽可能地猜想并真正理解当时发生的事情，我们别无选择，只能建立一套全新的反直觉的“常识”体系，来解释极端温度、密度和压力环境下物质的行为，以及这些行为背后的物理规则。

我们必须进入$E=mc^2$的世界。

1905年，爱因斯坦首次发表了这个著名公式的一个版本。正是在这一年，他那篇影响深远的论文《论动体的电动力学》（*Zur Elektrodynamik bewegter Körper*）发表在杰出的德国物理杂志《物理年鉴》（*Annalen der Physik*）上。虽然这篇论文以“电动力学”为题，但它最出名的内容却是爱因斯坦的狭义相对论，这套理论引入的概念永远地改变了时间和空间的概念。同一年晚些时候，年仅26岁的瑞士伯尔尼专利审查员爱因斯坦在同一家杂志上发表了另一篇简短（只有两页半）的论文《物体的惯性依赖于它的运动成分吗？》（*Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?*）。正是在这篇文章中，爱因斯坦提出了那个著名的公式。你不必花费时间去查找这篇文章，或是设计实验来验证爱因斯坦的理论，我们可以直接告诉你，这个问题的答案是肯定的。正如爱因斯坦在论文中所说：

如果某个物体以辐射的形式释放能量E，那么它的质量将减少E/c^2……质量衡量的是物体包含的能量；如果能量发生了变化（E），那么质量也会发生相应的变化。

爱因斯坦不太确定自己的理论一定就是对的，所以他也提出了建议：

利用某些所含能量高度可变的物体（例如，镭盐），我们或许可以通过试验来验证这套理论，这并不是不可能的事情。

于是你得到了这个方程。这是任何条件下物质与能量相互转化的代数秘诀，$E=mc^2$——能量等于质量乘以光速的平方。质能方程是一件超级强大的计算工具，它极大地拓展了我们对宇宙的认知和理解，无论是对眼前这个世界，还是对可以追溯到宇宙诞生之初那亿万分之一秒的碎片时间。有了这个等式，你就能算出一颗恒星能产生多少辐射能，或者你兜里的硬币能转化成多少有用的能量。

光子是我们最熟悉的能量形式。光无所不在，只是我们常常意识不到它的存在。光子没有大小，不可分割，它可能是可见光的一部分，也可能来自其他形式的电磁辐射。我们每个人时时刻刻都沐浴在光子的海洋中。从太阳、月亮到满天的星辰，从你家的炉子、枝形吊灯再到夜灯，从遍布全球的数以百计的广播电视站点到数不清的手机和雷达发射塔，光子的来源丰富多彩。那么，我们在日常生活中为什么看不到物质和能量相互转化呢？如果以公式$E=mc^2$来衡量，普通光子的能量根本不足以形成质量最小的亚原子粒子。这些光子蕴含的能量太少了，所以它们不可能转化成别的东西，只能继续过现在这样相对平静的简单生活。

你想看看$E=mc^2$真正发挥威力吗？那不妨从高能γ（伽马）射线光子开始——它蕴含的能量至少是可见光光子的20万倍。在这种射线的照射下，你很快就会死于癌症。不过在此之前，你会看到γ射线光子所到之处，一对对电子凭空出现，其中一个由物质构成，另一个由反物质构成（这只是宇宙中无数动态粒子-反粒子对中的一组而已）。你还会看到，物质-反物质组成的电子对彼此碰撞、湮灭，再次产生γ射线光子。要是将这些光子的能量再提高2000倍，这么强大的γ射线说不定能把某位对辐射特别敏感的人变成绿巨人。根据公式$E=mc^2$，拥有这么多能量的光子对可以创造出中子、质子和它们的反物质伙伴，这些粒子的质量差不多是电子的2000倍。高能光子不算常见，不过在宇宙中的某些“熔炉”里，你的确能看到它们的身影。以γ射线为例，几十亿摄氏度的环境基本都能产生这种射线。

从宇宙学的层面上说，粒子和能量包之间的相互转换至关重要。目前，在我们这个不断膨胀的宇宙中，科学家测量无处不在的微波光子，得到的温度只有微不足道的2.73K（开氏温标下的温度没有负数，粒子在0K时能量最低，室温大约是295K，水的沸点是373K）。和可见光的光子一样，微波光子温度太低，所以它根本不可能通过$E=mc^2$转化为其他粒子。换句话说，任何已知粒子都没有这么小的质量，所以能量极低的微波光子没有出路，只能维持现状。无线电波、红外线、可见光、紫外线和X射线光子的处境也相差无几。简单地说，光子的能量强度至少要超过γ射线才有可能转化为物质。不过，昨天的宇宙比今天的更小一点，也更热一点；前天的宇宙又更小、更热。如果我们把时钟往回多拨一些，比如拨到137亿年前——在大爆炸之后那锅原始汤里，整个宇宙的温度还很高，从天体物理学意义上说，每个角落都充满了γ射线。

理解从大爆炸到今天这段漫长的历史中空间、时间、物质和能量的运动，是人类的终极科学追求之一。要为那最初的时刻（那时候的宇宙

比之后的任何时刻都更小、更热）发生的所有事件建立一套完整的解释，你必须找到一种方法来让四种已知的基本力（引力、电磁力、强核力和弱核力）进行互动，将它们统一。除此以外，你还得设法调和目前互不相容的两个物理学分支：量子力学和广义相对论。

20世纪中叶，量子力学和电磁学成功联姻，得到鼓励的物理学家很快开始尝试将量子力学和广义相对论撮合成统一的量子引力论。到目前为止，他们所有的尝试都以失败告终，不过我们已经找到了难点所在，那就是所谓的“普朗克时期”（Planck era）。这个时期指的是从宇宙诞生到10^{-43}秒的阶段。信息传播的速度永远不可能超过光速，即299792千米/秒，所以在普朗克时期，假设有一位观察者位于宇宙中的任意一点，那么他最多只能看到周围约3×10^{-35}米范围内发生的事情。这个短得不可思议的时间和距离得名于德国物理学家马克斯·普朗克（Max Planck）。1900年，普朗克首次提出了“量子化能量”的概念，他也因此成了公认的量子力学之父。

不过我们也不用担心，虽然量子力学和相对论无法统一，但我们的生活一如往常。量子力学和引力的分歧不会对我们现在的宇宙产生任何实质性的影响。现在的天体物理学家分别采用广义相对论和量子力学的原理和工具来处理两类完全不同的问题。不过在最初的普朗克时期，大就是小，所以我们必须想个法子强行把这两套理论糅合到一起。令人悲伤的是，我们一直找不到缔结这段婚姻所需的誓言，目前任何（已知）物理定律都无法准确描述最初那短暂的蜜月期内，膨胀的宇宙迫使极大和极小分道扬镳之前发生的事情。

普朗克时期快要结束的时候，引力从其他基本力中分离出来，拥有了能被现有理论很好地描述的全新独立身份。随着宇宙的年龄跨过10^{-35}秒，它继续膨胀冷却，曾经统一的基本力也进一步拆分成了电弱力和强核力。又过了一段时间，电弱力又拆分成电磁力和弱核力，我们熟悉的四种基本力就此成形——弱核力控制辐射衰变，强核力将每个原子核内部的粒子结合在一起，电磁力让原子凝聚成分子，引力又将大量物质凝聚在一起。等到宇宙迈过第一个10^{-12}秒，分化后的力和其他关键因素已经赋予了宇宙一些基本的性质，每种性质都值得专门用一本书来介绍。

宇宙迈过第一个10^{-12}秒的时候，物质和能量的相互作用仍在进行。在强核力和电弱力分离前后的短暂时间里，宇宙是夸克、轻子、它们的反物质兄弟，以及玻色子（正是由于玻色子的存在，以上所有粒子才会产生互动）组成的沸腾之海。据我们目前所知，这些粒子都不可能再切割成更小、更基本的东西。它们都是基本粒子，每个基本粒子家族有好几位成员。比如说，包括可见光粒子在内的光子就属于玻色子家族。普通人最熟悉的轻子大概是电子，可能还有中微子，而我们最熟悉的夸克……呃，没有我们熟悉的夸克，因为日常生活中的夸克通常紧紧地结合在一起，形成质子和中子之类的粒子。每种夸克都有一个抽象的名

字，从修辞、哲学或教育角度来说，这些名字没有任何实际意义，它们唯一的作用就是区分不同的夸克。六种夸克分别被命名为：上、下、奇、粲、顶和底。

顺便说一下，玻色子得名于印度物理学家萨特延德拉·玻色（Satyendranath Bose）。“轻子”（lepton）这个词来自希腊词语“leptos”，意思是“轻”或者“小”。而“夸克”（quark）这个名字的历史渊源更为久远，也更富想象力。1964年，美国物理学家默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann）首次提出了夸克的存在，当时他认为，夸克家族只有三位成员；这种粒子的名字来自詹姆斯·乔伊斯（James Joyce）的作品《芬尼根的守灵夜》（*Finnegans Wake*）中一句晦涩的台词：“向麦克老大三呼夸克！”夸克至少有一个优势：所有夸克的名字都很简单——对化学家、生物学家和地质学家来说，这简直是个无法实现的成就。

夸克十分古怪。不同于拥有一个正电荷的质子或者拥有一个负电荷的电子，夸克拥有的电荷数以1/3为基本单位。你永远不会找到单独出现的夸克，极端情况除外。夸克总是和一个或者两个同伴紧紧地结合在一起。事实上，如果你试图分开结合在一起的两个（或者更多）夸克，那么它们之间的结合力反而会变强——就好像某种亚原子核橡皮筋把它们绑到了一起。不过，如果你把这几个夸克分得足够远，橡皮筋就会断裂。根据公式$E=mc^2$，橡皮筋储存的能量会在两头分别创造一个新的夸克，于是你又回到了故事的起点。

宇宙诞生的第一个10^{-12}秒被称为“夸克-轻子时期”，这个时期的宇宙非常稠密，独立夸克之间的平均间隙很小，和结合在一起的夸克几乎没有区别。在这种情况下，相邻的夸克根本不可能建立一对一的清白关系，所以实际上，它们完全是自由的。2002年，长岛布鲁克海文国家实验室（Brookhaven National Laboratories）的一个物理学家团队首次通过实验探究了物质的这种状态，它被形象地命名为“夸克汤”。

无论是基于理论还是基于观测结果，我们都会发现，在宇宙极早期的某个时间段里（可能就是某种基本力和其他力分离的时候），宇宙出现了明显的不对称，物质粒子的数量比反物质粒子多了十亿分之一。这个微妙的变化为今天的我们提供了存在的基础。在宇宙早期那锅翻滚的粒子汤里，夸克和反夸克、电子和反电子（它更广为人知的名字是“正电子”）、中微子和反中微子不断地诞生、湮灭，然后再次诞生，你很难注意到物质和反物质数量的细微差别。在这个时期，多余的家伙——多出来的那一点点物质——有足够的机会找到携手共赴湮灭的伙伴，其他粒子也一样。

但好景不长。随着宇宙继续膨胀冷却，它的温度很快降低到1万亿K以下。现在，大爆炸刚刚过去了10^{-6}秒，但这个温吞吞的宇宙已经失去了烹饪夸克汤所需的温度和密度环境。所有夸克迅速抓住身边的舞伴，建立矢志不渝的重粒子（强子，hadron，来自希腊语“hadros”，意思是“厚重”）的家庭。夸克转化成强子，这一过程在极短的时间内制造出

了质子、中子和其他一些我们不那么熟悉的重粒子，每种强子都代表着夸克的不同组合。现在，强子也继承了夸克-轻子汤中物质与反物质的不对称性，这个现象带来了惊人的结果。

随着宇宙不断冷却，可用于自发创造粒子的能量稳步下降。到了强子时期，光子已经无法继续激发质能转换反应，制造出夸克-反夸克对，因为它们的能量不能满足粒子对的质量需求。此外，在这个不断膨胀的宇宙里，残存的湮灭反应释放的光子还在继续损失能量，最终它们的能量降到了创造强子-反强子对所需的阈值以下。每10亿次湮灭会产生10亿个光子，只有1个强子会幸存下来，成为早期宇宙物质-反物质不对称性留下的哑巴证人。这些孤独的强子最终将享受到身为物质的最大乐趣：它们将创造出星系、恒星、行星和人类。

如果没有物质和反物质粒子这十亿分之一的细微不对称，宇宙中的所有物质（除了我们目前尚不清楚其具体成分的暗物质以外）都将在大爆炸之后的一秒内彻底湮灭，我们（如果我们还有机会存在的话）只能看到光子，除此以外别无他物——简直就是终极版的“要有光”。

这时，宇宙的时钟刚刚走过第1秒。

10亿K的宇宙依然滚烫，足以继续维持电子和正电子（反电子）诞生-湮灭的无限循环。但这个宇宙还在继续膨胀、冷却，它们的好日子没几天了，或者更确切地说，没几秒了。现在，电子和正电子也遭遇了和强子一样的命运：它们彼此湮灭，每10亿对电子-正电子中只有1个电子幸存下来，在物质与反物质的自杀盛宴中，这个孤独的电子是唯一的幸存者。其他电子和正电子通过湮灭融入宇宙，形成了更广阔的光子之海。

随着电子-正电子的湮灭时期逐渐落幕，宇宙“凝结”成了实体，每个电子都有单个对应的质子。宇宙还在继续冷却，它的温度降到了100万K以下，质子开始和其他质子或中子聚合形成原子核；在这个时期，宇宙中90%的原子核都是氢，剩下的10%是氦，还有极少量的氘、氚和锂原子核。

此时，大爆炸已经过去了2分钟。

从这时候开始，直到38万年以后，氢原子核、氦原子核、电子和光子组成的粒子汤才会再次发生巨变。在这几十万年里，宇宙的温度依然很高，足以允许电子在光子之间自由运动，互相碰撞。

很快我们就将在第三章中看到，随着宇宙的温度降到3000K（相当于太阳表面温度的一半）以下，这样的自由戛然而止。大约在这个时期，所有电子都被纳入原子核周围的轨道，原子就此成形。电子和原子核结合生成的原子沐浴在无处不在的可见光粒子中，粒子和原子就这样形成了原始的宇宙。

随着宇宙继续膨胀，宇宙中的光子也在继续损失能量。无论今天的天体物理学家望向哪里，他们都会发现微波光子在宇宙中留下的2.73K的温度指纹，这意味着自宇宙诞生以来，光子的能量衰减至0.1%。光子在天空中的分布——来自不同方向能量的确切数量——仍遵循原子形成之前宇宙中物质分布的规律。通过研究这些分布模式，天体物理学家知道了很多事情，包括宇宙的年龄和形状。虽然事到如今，原子已经成了宇宙日常生活的一部分，但爱因斯坦的质能方程还有许多用处，比如说，它可以应用于粒子加速器，这种设备内部的能量场会定期创造出物质-反物质粒子对；质能方程还适用于太阳核心，那里每秒都有440万吨物质被转化为能量，其他所有恒星的核心也会发生类似的事情。

$E=mc^2$还适用于黑洞附近，也就是事件视界边缘。黑洞有可能消耗自身大得惊人的引力能，创造出粒子-反粒子对。1975年，英国宇宙学家史蒂芬·霍金（Stephen Hawking）首次描述了这样的盛宴，根据这一机制，黑洞的质量可能会慢慢蒸发殆尽。换句话说，黑洞并不是真的漆黑一片。这一现象名叫“霍金辐射”（Hawking radiation），它提醒我们，爱因斯坦的著名方程仍拥有惊人的生命力。

但在这场宇宙盛宴开场之前，又发生过什么？大爆炸之前的世界是什么样子？

天体物理学家回答不了这个问题。或者应该说，虽然提出了许多创意十足的想法，但我们几乎找不到任何实际的证据。不过各种宗教信仰倒是喜欢扬扬得意地宣称，开始的开始，肯定有什么事情触动了大爆炸的开关，某种至高无上的强大力量是世间一切的源泉，这就是所谓的第一推动力。当然，在笃信宗教的人眼里，这样的存在非上帝莫属。每位笃信者心目中的上帝各不相同，但他们无一例外地担起了“发球”的重任。

不过，如果宇宙一直存在，无所谓开始，只是现在的我们还无法描述它当时的状态或条件（举个例子，如果多重宇宙是真的，我们如今称之为宇宙的所有东西其实不过是泡沫之海中微不足道的一个泡泡），那又怎样？或者，如果宇宙和粒子一样，就是从无到有地突然冒了出来呢？

这样的反驳满足不了任何人，但它却能提醒我们，正是因为深知人类的无知，从事研究的科学家才能心平气和地面对不断拓展的知识疆界。那些坚信自己无所不知的人不会刻意去寻找，更不会在无意中发现宇宙中已知和未知的边界。这里隐藏着一个十分有趣的分野。如果有人问你：“大爆炸之前的宇宙是什么样子？”那么“宇宙始终都在”绝不是个值得称赞的答案。但是对很多宗教人士来说，如果有人问：“上帝诞生之前的世界是什么样子？”“上帝始终都在”却是一个令人愉悦的自然而然的回答。

无论你拥有何种身份，探查事物的源头和机制总会触发你的热情，

仿佛弄清原因就能让你对后来发生的事情产生某种亲近感，甚至掌控感。所以，生活中的道理也同样适用于宇宙：明白我们从哪里来，这件事情的重要性绝不亚于知道我们要往哪里去。

第二章　反物质的重要性

粒子物理学家是物理学界“最古怪但也最有趣术语大赛”的常胜将军。除了这个领域以外，你还能上哪儿去找“一个带负电的μ子和一个μ中微子交换了一个中性向量玻色子”或者“一个奇夸克和一个粲夸克交换了结合的胶子”这种描述？除了数不清的名字特别奇怪的粒子以外，粒子物理学家还得对付反粒子构成的平行宇宙，我们把这些粒子统称为“反物质”。作为科幻故事里的常客，反物质真实地存在于我们的宇宙中。和你想的一样，反物质的确会尽可能地寻找机会接触正常物质，然后一起湮灭。

反粒子和粒子之间的关系有一种别样的浪漫。它们共同诞生于纯能量中，最后又通过湮灭将彼此的质量重新化作能量。1932年，美国物理学家卡尔·戴维·安德森（Carl David Anderson）发现了反电子，这种带正电的反物质粒子对应的是带负电的电子。从那以后，粒子物理学家在世界各地的粒子加速器里制造出了各种各样的反粒子，但是直到最近，他们才利用反粒子获得了完整的反原子。从1996年开始，在瓦尔特·厄莱尔特（Walter Oelert）的领导下，德国于利希核物理研究所的一个国际团队经过多年努力终于创造出了反氢原子，在这个反原子内部，一个反电子愉快地绕着一个反质子旋转。为了制造出这些反原子，物理学家使用了位于瑞士日内瓦的欧洲粒子物理研究所（European Organization for Nuclear Research，这个机构更广为人知的称号是它的法语名称缩写，CERN）的巨型粒子加速器，这台设备为粒子物理学的发展做出了诸多重要贡献。

这些物理学家用一种简单的方式创造原子：他们制造出了一大堆反电子和一大堆反质子，然后将这些反粒子放到合适的温度和密度环境下，等待它们自行组成原子。厄莱尔特的团队在第一轮实验中就制造出了9个反氢原子。不过在这个正常物质占据绝对统治地位的世界里，反物质原子的生命十分短暂。这批反原子甚至没有活过40纳秒（1纳秒＝10^{-9}秒）就和正常原子一起湮灭了。

反电子的发现是理论物理最伟大的成就之一，因为就在几年前，生于英国的物理学家保罗·A. M.狄拉克（Paul A. M. Dirac）刚刚预测了它的存在。

为了描述最小尺度的物质（原子和亚原子粒子），20世纪20年代，物理学家发展出了一门新的分支来解释这些粒子的实验结果。利用新建立的理论（现在我们称之为“量子力学”），狄拉克根据他的方程的第二个解提出了一个假设：来自“另一边”的幽灵电子可能会以普通电子的面

目突然出现在我们的世界里，从而在负能量的海洋中留下一个缺口，或者说一个洞。虽然狄拉克试图通过这种方式来解释质子，但其他物理学家却提出，这个洞可能会表现为一个带正电的反电子，由于它携带正电荷，现在我们更喜欢叫它“正电子”。正电子的发现证实了狄拉克的基本观点，也为反物质奠定了和物质一样值得尊重的地位。

拥有两个解的方程并不罕见。举个最简单的例子：哪个数的平方等于9？是3还是-3？当然，这两个答案都对，因为3乘以3等于9，-3乘以-3也等于9。物理学家无法保证某个方程的所有解都能与现实世界中的事件对应起来，但如果某个物理现象的数学模型正确无误，那么琢磨方程总比琢磨整个宇宙简单，而且同样有用。就像狄拉克和反物质的故事一样，方程的多个解常常带来各种各样的预测。如果这些预测被证明是错误的，那么人们就会抛弃相应的理论。但无论最后得到什么样的结果，数学模型总能确保你得出的结论既拥有逻辑上的合理性又具备内在的一致性。

亚原子粒子拥有多种可测量的特性，其中最重要的是它的质量和电荷数。某种粒子和它的反粒子通常拥有相同的质量，除此以外，它们的所有特性总是截然相反。比如说，正电子的质量和电子一样，但正电子携带一个单位的正电荷，而电子携带一个单位的负电荷。与此类似，反质子携带的电荷也正好和质子相反。

不管你信不信，不带电的中子也有对应的反粒子。它名叫——你猜猜看？——反中子。反中子和中子携带的电荷正好相反，我们可以称它携带“-0”电荷。这不是抬杠，我们之所以这么说，根本原因在于中子是由3个携带不完整电荷的粒子（夸克）组成的。构成中子的3个夸克携带的电荷数分别是-1/3、-1/3和2/3，而反中子内部的3个夸克携带的电荷数则是1/3、1/3和-2/3。每组夸克的总电荷数都是零，但它们各自携带的电荷却是相反的。

反物质可能突然凭空出现。如果γ射线光子拥有足够的能量，它们就能自行转化成电子-正电子对，通过这种方式，γ射线拥有的海量能量变成了微不足道的一点点物质，这个过程满足爱因斯坦的著名方程$E=mc^2$。

根据狄拉克最初的解释，γ射线光子会将电子从负能量的领域中激发出来，由此创造出一个普通的电子和一个电子洞。这个过程反过来也成立。如果一个粒子和一个反粒子发生碰撞，它们会互相湮灭，填满这个洞，同时释放出γ射线。你千万记得小心避开γ射线。

如果你在家里不小心捣鼓出了一团反粒子，那可真是骑虎难下了。很快你就将面临仓储的难题，也许你准备了保鲜盒或者购物袋之类的容器，但不管它是纸质的还是塑料的，反粒子都会和它发生湮灭。更聪明的做法是利用强磁场来束缚带电反粒子，强大的磁场“墙壁”虽然看不见也摸不着，却能牢牢地将反粒子锁起来。将反粒子存放在这样的真空磁

场里，你就不用担心它会和普通物质一起湮灭了。这样的“磁瓶”也适合存放其他可能损伤容器的材料，譬如（受控）核聚变实验中的灼热气体。要是你创造出了完整的反原子，那么仓储问题的难度还会再上一个台阶，因为和原子一样，反原子通常无法被磁壁束缚。最明智的做法或许是将你的正电子和反质子分别存放在单独的磁瓶里，等到有需要的时候再把它们混合起来。

要创造出反物质，你需要的能量至少应该相当于它与物质湮灭时释放出来的能量。如果没有在发射前准备好一整箱反物质燃料，反物质引擎就一定会在运转中缓慢地从你的飞船中汲取能量。原版的《星际迷航》剧集和电影也许体现了这个事实，不过要是我记得没错的话，柯克船长总是要求反物质引擎“加大点马力”，而斯科提永远操着一口苏格兰腔回答：“引擎无法承受。”

虽然物理学家认为氢原子和反氢原子的运动规律应该完全一致，但他们尚未通过实验证明这一预测，主要是因为保存反氢原子实在太难。这些反原子几乎一诞生就会立刻与质子和电子发生湮灭。科学家非常希望证实，反氢原子内部正电子和反质子的运动完全遵循量子力学定律，反原子的引力也和普通原子一模一样。不过，我们也许应该思考一个更深的问题：既然普通原子产生的是引力，那么反原子会不会产生反引力（斥力）？现有理论推出的结论倾向于后者，但如果最终事实证明前者才是正确的，那么我们又将得到许多关于自然的新洞见。从原子层面上说，任何两个粒子之间的引力都非常非常小。决定这些微小粒子如何运动的主要因素不是引力，而是电磁力与核力，因为这两者都比引力强得多。要验证反引力的性质，你需要足够多的反原子来组成宏观的反物体，这样你才能测量它们的集合特性，然后与普通物质进行比较。如果我们能用反物质制造一套台球（当然，还有台球桌和台球杆），那么这场“反台球”游戏和普通的台球游戏有何区别？反8号球坠入角落球袋的方式是否和普通的8号球完全相同？反行星围绕反恒星公转的方式是否和普通行星围绕普通恒星的公转方式完全一致？

根据朴素的哲学和现代物理学的种种预测，最合理的假设或许应该是，反物质在宏观层面上的性质和普通物质完全一致——引力相同、碰撞相同、光相同，以此类推。糟糕的是，这意味着如果一个反星系正在冲向我们的银河系，那么我们不会发现它和其他正常星系有任何不同之处，等到我们终于反应过来，那就干什么都来不及了。但如此可怕的命运在今天的宇宙中应该非常罕见，因为某颗反恒星与正常恒星碰撞湮灭必然会爆发出海量的γ射线，物质与反物质掀起的能量巨浪将迅速传遍整个宇宙。如果两颗质量和太阳相仿的恒星（每颗恒星分别拥有10^{57}个粒子）在我们的星系中发生碰撞，那么在它们湮灭的那一刻，那颗璀璨天体爆发的能量将超过1亿个星系中所有恒星释放的能量总和，我们的世界也将在这个瞬间彻底蒸发。我们还没有找到任何可以证明宇宙中的确发生过此类事件的有力证据。我们只能推测，大爆炸之初的那几分钟结束之后，普通物质就成了宇宙主要的组成部分。所以，踏上星际旅途的时候，物质与反物质的碰撞大概不是你最需要担心的安全问题。

不过，现在的宇宙不平衡得令人担忧。我们原本以为粒子和反粒子是成对地被创造出来的，结果现在，我们却看到了一个以普通粒子为主的宇宙，反粒子的缺失仿佛根本无关紧要。这会不会是因为，宇宙中有一部分反物质被装在小袋子里藏了起来？这会不会是因为宇宙诞生之初，某个物理定律遭到了破坏（或者出于某种未知的物理机制），永远地打破了物质和反物质之间的平衡？我们或许永远都找不到这些问题的答案，不过至少在今天，如果你家院子里突然冒出来一个外星人，如果他友好地向你伸出了附肢，那你千万不要表现得过于热情，最好先朝他扔一个8号球。如果附肢碰到球就发生了爆炸，那么这位外星人没准是反物质组成的（我们暂且不必考虑这位不速之客和他的伙伴会对你的“欢迎仪式”作何反应，也不要琢磨爆炸对你有何影响）。如果什么都没有发生，那你就能放心大胆地带着这位新朋友去见领导了。

第三章　要有光

大爆炸之后的0.01秒内，宇宙的温度之高，超乎我们的想象，这个璀璨至极的世界最重要的任务是不断膨胀。每时每刻，宇宙都在不停地变大，越来越多的空间从虚无变为真实的存在（这或许很难想象，不过在这个问题上，事实胜于常识）。在膨胀的过程中，宇宙也在不断冷却、变暗。几十万年里，物质和能量彼此交缠，搅成了一锅浓汤，飞速运动的电子与光子不断发生碰撞，使光子向着四面八方散射。

在这个阶段，看遍整个宇宙恐怕是个不可能完成的任务。光子在进入你眼睛之前的几纳秒内，就会被你面前的电子弹开。无论望向哪里，你只能看到一片模糊的光雾，半透明的红白色强光弥漫在你周围，亮度堪比太阳表面。

光子携带的能量随着宇宙的膨胀不断下降。直到年轻的宇宙迈过38万岁的门槛，它的温度降到了3000K以下，质子和氦原子核终于能够永久性地捕获电子，原子就此诞生。在此之前，每个光子携带的能量都足以击碎新形成的原子，但是此时，得益于宇宙的膨胀，光子失去了这样的能力。捣乱的自由电子变少了，光子才能在空间中飞驰，不必担心撞上什么东西。在这个阶段，宇宙变得透明起来，浓雾散去，遍布宇宙的背景可见光获得了自由。

这些残余的背景光一直存留到了今天，它们来自炽热混沌的早期宇宙。无处不在的光子拥有波和粒子的双重性质。光子的波长等于两个相邻波峰之间的距离——你可以用尺子来测量这段距离，如果你能抓到光子的话。真空中的所有光子以相同的速度运动，即299792千米/秒，我们顺理成章地称之为光速。光子的波长越短，每秒经过特定点的波峰数量就越多。正是出于这个原因，光子的波长越短，单位时间传播的波的数量就越多，光的频率也越高，每秒经过特定点的波的数量也越多。光子的频率直接影响它的能量：频率越高的光子携带的能量越多。

在宇宙冷却的过程中，光子因为宇宙膨胀而损失了能量。从γ射线和X射线中诞生的光子一步步变成了紫外线光子、可见光光子，乃至红外线光子。随着波长的增长，光子的温度变得越来越低，携带的能量也越来越少，但它的基本性质始终不曾改变。在大爆炸137亿年后的今天，宇宙背景光子的频率已经降低到了微波的范围内，所以天体物理学家才叫它“宇宙微波背景辐射”，不过更具前瞻性的名字应该是“宇宙背景辐射”（Cosmic Background Radiation，CBR）。从现在开始，再过1000亿年，等到宇宙进一步膨胀冷却，未来的天体物理学家或许会认为CBR应该叫作“宇宙无线电波背景辐射”。

随着宇宙不断膨胀变大，它的温度也直线下降。这是由物理定律决定的。宇宙中不同区域之间的距离变得越来越远，CBR光子的波长必然随之变大。时间和空间的构造像弹性纤维一样拉长了宇宙中的光波。由于光子的能量和它的波长成反比，自由光子的波长每增加一倍，它的能量就会降低一半。

任何高于绝对零度的物体都会向外辐射全波长谱系的各种光子，但这样的辐射存在峰值。家用普通电灯泡输出的光子能量峰值落在红外线范围内，所以你才会觉得灯光照得你的皮肤暖烘烘的。当然，灯泡也会释放出足量的可见光，不然我们就不会买它了。因此，你的眼睛和皮肤都能感受到台灯的辐射。

宇宙背景辐射的输出峰值波长大约是1毫米，正好落在微波范围内。步话机里咝咝的静电音就来自无所不在的微波，CBR贡献了其中的一部分，其余的“噪声”则来自太阳、手机、警用测速雷达等干扰源。除了峰值的微波辐射以外，CBR还包含了少量的无线电波（所以它会干扰地球上的无线电信号）和极微量的频率高于微波的光子。

20世纪40年代，生于乌克兰的美国物理学家乔治·伽莫夫（George Gamow）和他的同事预测了CBR的存在。1948年，他们在一篇论文中运用当时已知的物理定律分析了早期宇宙的古怪状况。他们的基础观点来自比利时天文学家兼耶稣会牧师乔治·爱德华·勒梅特（Georges Edouard Lemaître）于1927年发表的一篇论文，现在勒梅特已经成了举世公认的“大爆炸理论之父”。不过，首次预测宇宙背景温度的科学家不是伽莫夫，而是两位曾经跟他合作过的美国物理学家：拉尔文·阿尔菲（Ralph Alpher）和罗伯特·赫尔曼（Robert Herman）。

阿尔菲、伽莫夫和赫尔曼提出了一个假说（今天的我们可能觉得这个想法相当简单，因为学界已经得出了定论）：昨天的时空构造比今天的更小。根据物理学的基本规律，更小就意味着更热，所以物理学家回望宇宙的开端，推演出了我们刚才描述的那个时期。当时的宇宙过于炽热，以至于所有原子核都孤零零地暴露在外，因为光子的碰撞解放了所有电子，让它们在空间中自由游荡。阿尔菲和赫尔曼提出，在这种情况下，光子不可能像今天一样在宇宙中自由穿行。如今的光子之所以能够畅行无阻，是因为宇宙的温度降低到了一定程度，电子能够在原子核周围的轨道上安定下来。完整的原子诞生以后，光才能在宇宙中自由穿行。

早期宇宙的温度一定比现在高得多。虽然这个决定性的观点是伽莫夫提出的，但阿尔菲和赫尔曼却首次算出了早期宇宙温度残留至今的余韵：5K。其实他们算错了，现在CBR的确切温度是2.73K。但无论如何，这三位科学家成功推演出了早期的宇宙面貌，虽然那段历史早已湮没在时空的长河中，但这仍是科学史上最伟大的成就之一。根据在实验室里总结出的最基本的原子物理法则，他们推演出了人类有史以来研究过的尺度最大的对象（我们这个宇宙的温度史），这绝对是个颠覆性的

成果。普林斯顿大学的天体物理学家J.理查德·戈特三世（J. Richard Gott III）在《爱因斯坦宇宙中的时间旅行》（*Time Travel in Einstein's Universe*）一文中盛赞了这一发现："预测宇宙背景辐射的存在并准确计算出它的温度，误差在两倍以内，这是个了不起的成就。这相当于预测一艘直径15米的飞碟将降落在白宫的草坪上，结果我们看到了一艘直径8米的飞碟缓缓落地。"

伽莫夫、阿尔菲和赫尔曼做出这些预测的时候，物理学家还没确定宇宙是怎么诞生的。1948年，也就是阿尔菲和赫尔曼的论文问世的同一年，在英国发表的两篇论文提出了一套恒稳态理论，其中一篇论文由数学家赫尔曼·邦迪（Hermann Bondi）和天体物理学家托马斯·戈尔德（Thomas Gold）共同撰写，另一篇论文的作者则是宇宙学家弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）。根据恒稳态理论，宇宙在膨胀过程中将始终保持不变——简洁是这套假说最诱人的特质。但是，既然宇宙不断膨胀，稳定态宇宙的温度和密度又始终保持一致，那么按照邦迪、戈尔德和霍伊尔的设想，物质必须以恰到好处的频率持续地凭空出现在这个宇宙中，这样宇宙才能在膨胀的同时维持它的密度不变。与此相对，大爆炸理论（弗雷德·霍伊尔轻蔑地给它起了这个名字）则要求所有物质瞬间同时出现，某些人认为这套假说更对胃口。请注意，恒稳态理论将宇宙起源的时间推向了无限远处——对那些不愿意应对这个棘手问题的人来说，这真是方便极了。

宇宙背景辐射的预测就像一支拉满弦的利箭，它的箭头对准了恒稳态理论的要害。CBR的存在将清晰地证明，昔日的宇宙和我们今天看到的很不一样——它比现在小得多，也热得多。因此，关于CBR的第一批直接观测结果给恒稳态理论的棺材钉下了第一颗钉子（但弗雷德·霍伊尔从不曾完全接受这样的现实：CBR推翻了他优雅的理论。终其一生，他一直试图为这种辐射寻找其他解释）。1964年，阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）在新泽西州美利山（Murray Hill）的贝尔电话实验室（简称"贝尔实验室"）偶然发现了CBR的存在。1978年，他们的勤奋和幸运得到了奖励，彭齐亚斯和威尔逊荣获诺贝尔物理学奖。

彭齐亚斯和威尔逊是怎么拿到诺贝尔奖的呢？20世纪60年代初，物理学家已经知道了微波的存在，但谁也无法准确探测微波波段的微弱信号。那时候的无线通信设备（例如，接收器、探测器和发送器）主要针对波长更长的无线电波。要捕捉微波，科学家需要能对波长更短的波进行探测的探测器和灵敏的天线。贝尔实验室就有一套这样的设备，这台巨大的喇叭状天线能专门捕捉微波，而且性能和普通设备一样好。

发送或接收信号的时候，你肯定不希望受到其他信号的干扰。彭齐亚斯和威尔逊试图为贝尔实验室开辟一个新的通信频道，他们希望确定这些信号会遭受多少"背景"干扰，无论这些干扰是来自地面、太阳、银河系中心，还是其他地方。为了确定探测微波信号的难度，他们开始进行一些标准测量。当时他们完全不知道，这些看似普通的测量将产生多

么重大的影响。虽然彭齐亚斯和威尔逊都有天文学的背景，但他们不是宇宙学家，而是研究微波的技术派物理学家。对于伽莫夫、阿尔菲和赫尔曼做出的预测，他们根本一无所知。寻找宇宙微波背景辐射绝对不是他们的目标。

就这样，他们开始了实验。校正数据的时候，两位科学家排除了一切已知的干扰源，但最后他们发现，信号中的背景噪声还是没有消失，他们完全想不出摆脱它的办法。地平线上的每个方向似乎都有噪声，而且不随时间变化。最后，他们决定检查一下大喇叭内部，结果发现鸽子在天线里面筑了巢，鸽巢附近沾满了白色的绝缘物质（鸽粪）。当时的彭齐亚斯和威尔逊肯定陷入了绝望——难道信号里的背景噪声来自鸽粪？他们清理了天线，噪声的确减弱了一点，但还是没有消失。1965年，他们在《天文物理期刊》（*The Astrophysical Journal*）上发表了一篇论文，提到了这种无法解释的“多余的天线温度”；这两位物理学家全然不知，世纪性的天文发现就悬在他们的指尖。

彭齐亚斯和威尔逊在清理鸟粪的时候，普林斯顿大学的一群物理学家正在罗伯特·H.迪克（Robert H. Dicke）的带领下修建一台探测器，这台探测器将专门用来寻找伽莫夫、阿尔菲和赫尔曼预测的CBR。这些教授没有贝尔实验室充足的资源，所以他们的工作进展得很慢。彭齐亚斯和威尔逊的观测结果传到迪克团队耳朵里的那一刻，这群物理学家立即明白，他们晚了一步。他们当然知道所谓的“多余的天线温度”到底是什么。观测结果完全符合理论假说：温度符合预测，来自任何方向的信号强度完全相同，而且它不受时间影响，这意味着地球自转或者地球在绕日公转轨道上的位置都与它无关。

但我们为什么会接受这套解释呢？理由非常充分。光子从遥远的宇宙深处传到我们这里需要时间，所以当我们将目光投向深邃的宇宙，看到的景象必然来自过去。这意味着如果有另一群智慧生物定居在某个遥远的星系里，他们测量宇宙背景辐射的时间比我们早得多，那么他们测出的温度必然高于2.73K，因为在那个时候，宇宙比现在更年轻、更小也更热。

这个大胆的猜想能被证实吗？当然。我们发现，一种名叫“氰”的碳氮化合物——它最广为人知的用途是给杀人犯执行死刑——一旦暴露在微波中就会被激发。如果某种微波的温度高于现在的CBR，那么氰分子被激发的程度也会略高于CBR。因此，氰可以充当宇宙的温度计。当我们观测那些更遥远也更年轻的星系时，我们应该发现，那里的氰沐浴在比银河系CBR温度更高的宇宙背景辐射中。换句话说，那些星系应该比我们的银河系更有活力。事实也的确如此。来自远方星系的氰的光谱表明，那里的微波温度的确符合我们对更早期宇宙的推想。

这些事可做不了假。

对天体物理学家来说，CBR的意义绝不仅仅是为宇宙的灼热过往和大爆炸理论提供了最直接的证据，他们还发现，组成CBR的光子承载着宇宙变得透明之前和之后的大量细节信息。我们注意到，直到大爆炸大约38万年之后，宇宙仍是不透明的，所以就算你坐在第一排正中间，你也不可能亲眼见证物质的形成。你根本不可能看到星系团聚集成形的过程。在任何地方的任何人能看到任何值得一看的东西之前，光子就获得了在宇宙中畅通无阻的能力。每个光子都会在某个合适的时机遭遇与电子的最后一次碰撞，从此踏上跨越宇宙的漫长旅途。随着越来越多的光子摆脱电子的干扰（这得多谢电子和原子核一起形成了原子），它们形成了一层不断膨胀的光子壳，天体物理学家称之为“最后的散射面”（the surface of last scatter）。这层光子壳大约花费了10万年时间才逐渐成形，与宇宙中所有原子的诞生完全同步。

这个时候，宇宙中很多地方的物质已经开始聚集。物质聚集得越多，产生的引力就越强，这又进一步吸引了更多物质。这些物质富集的区域为超星系团的形成播下了种子，与此同时，其他区域相对比较空旷。物质聚集区的引力场越来越强，一些光子正好在这样的区域内经历了与电子的最后一次碰撞，那么这些光子离开这片区域的时候，引力场会剥夺它们的一小部分能量，从而使它们跌落到略微冷一点的谱系中。

宇宙中的确有某些地方的CBR比平均温度高一点点或者低一点点，但波动极小。这些热点和冷点标出了宇宙中最古老的结构，也就是物质最初聚集的地方。我们之所以知道物质今天的模样，是因为我们能看到星系、星系团和超星系团。为了弄清这些系统是如何形成的，我们开始深入研究宇宙背景辐射，这些来自遥远过去的不可思议的遗迹迄今仍充斥着整个宇宙。对CBR“图案”的研究构成了“宇宙颅相学”：我们摸索青年宇宙“颅骨”上的凹凸，反推它在婴儿期的行为，预测它在成年后的未来。

结合对地球和深空的其他观测结果，天文学家可以根据CBR确定宇宙的各种基本特性。比如说，我们可以比较热区和冷区的尺寸及温度分布，由此推测早期宇宙的引力强度，进而判断物质聚集的速度。接下来，我们还能推测宇宙中普通物质、暗物质和暗能量的比例（分别是4%、23%和73%）。知道了这些基本信息，“宇宙是否会永远膨胀下去”“宇宙的膨胀是否会随时间流逝而变慢或者变快”这些问题就简单多了。

我们每个人都是由普通物质组成的，普通物质既能产生引力，又能吸收、释放光，还能和光发生其他形式的互动。正如我们在第四章中即将看到的，暗物质是一种性质未知的存在，它能产生引力，却不会以任何已知的方式与光互动。我们会在第五章中介绍暗能量，它加快了宇宙膨胀的速度，如果没有暗能量，宇宙就不会膨胀得这么快。现在，借助宇宙颅相学，宇宙学家对早期宇宙已经有所了解，但对于现在的宇宙和过去的宇宙，我们一直不清楚其中的主要成分到底是什么。

尽管有那么多未知的谜团，但今天的宇宙学家已经得到了一件前所未有的强大工具。CBR承载着我们都曾经通过的那扇大门留下的印记。

100多亿年来，宇宙一直在不断地膨胀，最初我们通过对遥远星系的观测得出了这个结论，宇宙微波背景辐射的发现验证了这一点，由此提升了宇宙学的准确性。CBR的精准确保了宇宙学在实验科学领域的地位。起初，科学家利用气球搭载的设备和南极的一台望远镜探测天空中的小块区域，由此绘制了这张地图的初稿；后来他们又通过一颗名为“威尔金森微波各向异性探测器”（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe，WMAP）的卫星扫描整个天空，补完了整张地图。2003年，WMAP输出了第一批观测结果；在我们的宇宙学故事讲完之前，这颗卫星还将为我们提供更多信息。

宇宙学家总是那么自负，不然他们又怎么能大胆推测宇宙是如何诞生的呢？但宇宙学已经走入了基于观测的新纪元，现在他们或许需要改改脾气，变得谦逊一点。每一个新的观测结果，每一组新的数据都可能对你的理论产生影响。一方面，观测为宇宙学奠定了坚实的基础，在其他很多科学领域里，这样的基础完全是默认的，因为它们早就形成了成熟的实验室观测体系；另一方面，理论家曾在缺乏观测手段的年代凭空提出了大量不着边际的假说，新的数据必然会肯定其中的一部分，打破另外一部分。

科学的硕果离不开准确数据的浇灌。现在，宇宙学正在成为一门准确的科学。

第四章　要有暗

引力是自然界里我们最熟悉的力，它同时造就了自然界里最容易理解和最让人费解的现象。千年来最睿智、最具影响力的科学家艾萨克·牛顿（Isaac Newton）认识到，引力神秘的“远距离作用”来自每一点物质的天然效应，任意两个物体之间的引力都能用一个简单的代数方程来描述。20世纪最睿智、最具影响力的科学家爱因斯坦又进一步发现，我们可以将引力的远距离作用更准确地描述为物质和能量的任意组合造成的时空构造弯曲。爱因斯坦证明，牛顿理论需要做出一定的修正才能准确描述引力，在这个过程中，他预测了光线行经大质量物体时弯曲的程度。虽然爱因斯坦的方程看起来比牛顿的花哨，但它们完全符合我们所认知并热爱的物质的实际行为，包括我们能够看到、触碰、感觉、偶尔还会品尝的所有物质。

我们不知道下一个天才会是谁，但半个多世纪以来，我们一直在等待某个人来告诉我们，为什么我们在宇宙中测量到的引力大部分来自那些看不见、摸不着、无法触碰，更无从品尝的存在。也许这些多余引力的来源根本不是物质，而是另一些抽象的东西。无论如何，现在我们还全无头绪。星系的引力会影响它们的近邻，1933年，天文学家在测量某些星系的速度时首次发现了“消失的质量”。1937年，曾先后在保加利亚、瑞士和美国居住的天体物理学家弗里茨·兹威基（Fritz Zwicky）全面分析了这个谜团，但直到今天，我们在这个问题上仍然没有任何进展。兹威基在加州理工学院（California Institute of Technology）工作了40多年，这位科学家提出的宇宙学理论五花八门、丰富多彩，同样令人印象深刻的还有他挑衅同事的非凡能力。

兹威基研究的是一个巨型星系团内的星系运动，这些天体来自后发座（Coma Berenices，这个名字的意思是“贝蕾妮丝的头发”，贝蕾妮丝是埃及古代的一位王后），远离银河系的本地恒星。后发座星系团地处偏远，星系众多，它与地球的距离大约是3亿光年。数千个星系就像围绕蜂巢打转的蜂群一样绕着星系团中心旋转，运动方向各不相同。兹威基从中挑出了几十个星系，通过它们的运动来研究凝聚整个星系团的引力，结果发现，这些星系的平均速度大得惊人。引力越大，受其作用的天体运动速度也越快，因此兹威基推测，后发座星系团的质量一定非常非常大。如果把这些星系的估计质量全都加起来，后发座就会成为宇宙中最大、最重的星系团。即便如此，这个星系团中可见物质的质量也无法支撑这么快的星系运动速度。似乎有一部分物质凭空消失了。

如果你假设这个星系团并未处于某种奇怪的膨胀或坍缩状态，那么

你可以用牛顿引力定律算出这些星系理应拥有的典型平均速度。你需要的数据只有两组：星系团的尺寸，以及你估计的星系团总质量。星系与星系团中心之间的距离各不相同，星系团的总质量产生的影响也不一样，由此我们可以算出各星系的运动速度：如果星系的运动速度太慢，它就会坠入星系团中心，要是速度太快，它就会彻底脱离这个星系团。

牛顿曾用同样的方法根据各个行星与太阳之间的距离计算太阳系里每颗行星在绕日轨道上的公转速度。这些速度完全符合各个行星所在的引力环境。如果太阳突然变得更重，地球和太阳系里的所有天体都必须加快速度才能停留在目前的轨道上。但是，如果天体的公转速度太快，太阳的引力就不足以维持它们目前的轨道。要是地球的轨道速度增加到目前的两倍，我们这颗行星就将达到“逃逸速度”，然后（正如你猜到的那样）它会逃离太阳系。同样的道理也适用于比地球大得多的天体，例如，我们的银河系。银河系内某颗恒星运行的轨道由本星系其他所有恒星的引力共同决定，以此类推，星系团中的每个星系也会受到其他所有星系引力的影响。正如爱因斯坦在纪念牛顿的诗句（它的德语原文比译文更有震撼力）中写到的：

天上的星星告诉我们

大师的思想何等触手可及

每颗星星都遵循牛顿的数学

在轨道上默然运行

如果我们像20世纪30年代的兹威基一样仔细审视后发座星系团，我们会发现，它内部的所有星系运行的速度都超过了这个星系团的逃逸速度。但我们在计算逃逸速度时依据的星系团总质量，是将它拥有的所有星系质量一个个加起来得出的结果，而每个星系的质量又是根据它的亮度估计出来的。如果我们没算错的话，这个星系团应该迅速分崩离析，只余下些许痕迹供人缅怀它蜂巢般拥挤的过往，这个过程只需要几亿年到10亿年。但后发座星系团的寿命已经超过了100亿年，几乎和宇宙本身一样古老。这就是天文学上存在时间最长的谜团。

兹威基发现这个谜团之后的几十年里，天文学家又在其他星系团中观察到了同样的现象。所以，我们不能怪后发座太奇怪。那么我们该责怪谁呢？牛顿吗？那可不行，250年来，牛顿的理论经受了无数考验仍屹立不倒。那怪爱因斯坦？也不行。星系团的引力并没有强到必须全面动用爱因斯坦相对论的程度，兹威基开展研究的时候，这套理论才诞生了20多年。将后发座星系团凝聚在一起的力量也许真的来自“消失的质量”，只不过我们看不到它们，也不知道它们的性质。有一段时间，天文

学家将“消失的质量”重新命名为“消失的光”，因为这些质量是从多余的引力反推出来的。现在，天文学家更准确地估计了星系团的质量，于是他们提出了“暗物质”这个新词儿，不过更准确的描述或许应该是“暗引力”。

暗物质问题看不见的头颅再次浮出水面。1976年，华盛顿卡内基研究所（Carnegie Institution of Washington）的天体物理学家薇拉·鲁宾（Vera Rubin）在旋涡星系中也发现了“消失的质量”引发的异常。鲁宾研究的是恒星围绕自己所在的星系中心旋转的速度，刚开始她观察到的现象完全符合预想：在每个星系可见的星系盘内，远离星系中心的恒星运动速度大于更内侧的恒星。外侧恒星与星系中心之间的物质（恒星和气体）更多，所以它们需要转得更快才能留在轨道上。但是，在明亮的星系盘之外，我们仍能找到一些孤立的气体云和少量亮星，鲁宾利用这些天体来跟踪星系“外部”的引力场。虽然这些区域内没有能够增加星系总质量的可见物质，但她发现，“虚无村”里的这些天体运动速度还是很快——它们的速度本应随着距离的增加而下降。

这些广袤的真空区域是每个星系里都会有的荒野，其中包含的可见物质太少，根本无法支撑零星天体的飞速运动。鲁宾提出了一个合理的假设：旋涡星系边缘黑暗的偏远区域里一定存在某种形式的暗物质。事实上，这些暗物质形成的暗晕包围着整个星系。

暗晕问题就在我们的鼻子底下，我们的银河系里就有暗晕。可见天体质量与系统总质量之间总是存在偏差，几乎每一个星系和星系团都逃不掉这个问题，只是两个质量之间的比例系数差别巨大，有的只有2或3，有的可以达到几百。整个宇宙的平均系数大约是6。也就是说，宇宙中暗物质的质量是可见物质的6倍左右。

近25年来，进一步的研究告诉我们，这些暗物质的成分不可能是不发光的普通物质。科学家之所以得出这个结论，是因为他们几乎可以排除已知的任何候选者，这就像警察筛查嫌犯。这些不发光的物质会不会藏在黑洞里？不可能，要是真有这么多黑洞，它们的引力必然影响周围的恒星，那我们早就发现不对劲了。它们会不会是看不见的云？也不可能，云团会吸收后面的恒星发出的光，或者以其他方式与这些光互动，但真正的暗物质却不会。它们会不会是恒星之间（或者星系之间）的行星、小行星、彗星或者其他不发光的天体？我们很难相信宇宙中行星的质量能达到恒星的6倍，这意味着每颗恒星将对应6000颗木星，甚至200万颗地球。在我们的太阳系里，太阳以外的其他所有东西的质量加起来也只有太阳的0.2%。

因此，我们只能推测，暗物质不可能简单地由某些正好不发光的物质组成。恰恰相反，它完全是另一种存在。暗物质产生的引力和普通物质完全相同，但除此以外，我们几乎意识不到它的存在。当然，这个问

题陷入死胡同的深层原因在于，我们根本不知道暗物质到底是什么。探测暗物质之所以这么难，很大程度上是因为我们完全不了解它的性质，那么问题来了：既然所有物质都有质量，所有质量都会产生引力，那么反过来说，引力就一定来自物质吗？我们并不知道。暗物质指的是某种拥有引力但性质不明的物质，但也许这里根本就不存在什么物质，它就是一种我们完全不了解的引力。

要研究暗物质，我们不能光是假设它存在，然后就把它丢到一边。现在，天体物理学家正在试图弄明白，这些东西聚集在宇宙中的哪些地方。如果暗物质只存在于星系团边缘，那么星系的运动速度应该完全不受它的影响，因为星系运动的速度和轨道完全取决于其轨道内侧的引力源。如果暗物质只存在于星系团中心，那么（距离中心由近到远的）星系的运动速度应该只受分布于它们的轨道之间的普通物质的影响。但实际的观测结果却告诉我们，星系团内绕轨运行的星系所占据的空间里到处都有暗物质。事实上，普通物质和暗物质的位置有松散的重叠。几年前，美国天体物理学家J.安东尼·泰森（J. Anthony Tyson，他是本书一位作者的“托尼堂哥”，但两人实际上并不是亲戚）带领的团队（当时他们在贝尔实验室工作，现在转移到了加州大学戴维斯分校）首次描绘了巨型星系团内部及周围的暗物质引力分布详图。大星系所在的区域暗物质密集度很高，反之，没有可见星系的区域暗物质很稀少。

暗物质和普通物质的矛盾在某些环境里并不突出，但在某些环境里却特别扎眼，总的来说，这样的矛盾在大型天文系统中表现得最为明显，譬如星系和星系团。对于那些最小的天体（例如，卫星和行星）来说，暗物质和普通物质的矛盾根本就不存在。举个例子：我们脚下踩着的这颗星球足以解释地球表面的引力，所以要是你体重超标，千万别怪到暗物质头上。暗物质也不会影响月球绕地球运行的轨道，或者行星绕太阳的运动。但要解释恒星围绕星系中心的运动，我们就得祭出暗物质这面大旗了。

星系尺度的引力会不会遵循另一套物理规则？很可能不是这样。可能性更大的是，暗物质由一些我们尚不清楚其性质的东西组成，它们的分布比普通物质更加分散，否则我们会发现，每六片暗物质里就有一片上面粘着一团普通物质。据我们目前所知，事实并非如此。

有时候，天体物理学家会甘冒天下之大不韪，提出一些耸人听闻的观点，比如：我们知道和热爱的所有物质，包括恒星、行星和生命其实只是宇宙汪洋中漂浮的片片浮标，真正组成这片海洋的是一些虚无缥缈的东西。

但是，万一这个结论完全错了呢？在无路可走的情况下，一些科学家开始质疑其他试图理解宇宙的同行提出的假说所依据的基本物理定律，这是可以理解的。他们这么做也不算错。

20世纪80年代初，以色列雷霍沃特魏茨曼科学研究所（Weizmann Institute of Science）的以色列物理学家莫德采·米尔格若姆（Mordehai Milgrom）提出，我们应该对牛顿引力定律做出修改，现在这套理论被称为MOND（MOdified Newtonian Dynamics，修正版牛顿力学）。标准牛顿力学完全适用于星系以下的尺度。米尔格若姆提出，描述引力在星系和星系团尺度上的影响时，牛顿需要一些帮助，因为单个的恒星和星系团相距遥远，它们作用于彼此的引力相对较小。米尔格若姆为牛顿方程添加了一个条件，专门用于修正天文尺度下的引力效应。虽然米尔格若姆提出的MOND只是一个计算工具，但他也没有排除这样的可能性：说不定他的理论真的可以解释新的自然现象。

MOND的成功相当有限。这套理论的确可以解释很多旋涡星系外围孤立天体的运动，但它带来的问题比答案还多。MOND无法可靠预测更复杂系统的动力学特性，例如，它无法解释双星系或多系统的运动。此外，WMAP卫星于2003年绘制的宇宙背景辐射详图带来了新的契机，现在宇宙学家可以单独测量暗物质对早期宇宙的影响。他们得出的结果完全符合基于传统引力理论的连续宇宙模型，MOND因此失去了很多支持者。

宇宙的历史长达140亿年，在最初50万年的短暂时光里，宇宙中的物质已经开始聚集成团，其中一些后来发展成了星系团和超星系团。但宇宙一直都在膨胀，接下来的50万年里，它的尺寸将增加一倍。所以宇宙中的两种效应互相竞争：引力努力将物质聚集成团，但膨胀却总是试图撕碎这些团块。算一算你就会发现，普通物质的引力根本不可能打赢这场战争。它需要暗物质的帮助，如果没有暗物质，我们（确切地说，我们根本不会存在）将生活在一个极度松散的宇宙中：没有星系团、没有星系、没有恒星、没有行星，更没有人类。我们需要多少来自暗物质的引力？答案是：普通物质提供的引力的6倍。这样的分析彻底堵死了MOND对牛顿定律的小小修正。分析结果没有告诉我们暗物质到底是什么，只是证明了暗物质的影响真实存在——无论你怎么生拉硬拽，这份功劳也没法归到普通物质头上。

暗物质在宇宙中还扮演着另一个关键的角色。为了致敬暗物质为我们做的一切，我们不妨沿着时间的河流上溯到大爆炸之后的那几分钟，那时候的宇宙依然灼热致密，足以将氢原子核（质子）聚合在一起。早期宇宙的坩埚将氢锻造成了氦，以及极少量的锂和更少量的氘（一种比较重的氢原子核，由一个质子和一个中子构成）。这些原子核混合在一起，形成了大爆炸在宇宙中留下的另一枚指纹，凭借这些遗迹，我们得以重构宇宙诞生之初那几分钟的情景。创造这枚指纹的第一推动力是强核力——这种力将原子核中的质子和中子结合在一起——而不是引力，引力过于微弱，只有等万亿数量级的粒子聚集在一起之后，我们才能真正看到引力的效果。

等温度降到某个阈值以下，遍及宇宙的聚变已经将氦原子核和氢原子核的比例提高到了1：10。这个大坩埚还将大约千分之一的普通物质

锻造成了锂原子核，另有十万分之二的物质变成了氘。如果暗物质的成分不是某种无法产生任何互动的存在，而是不发光的普通物质，并且可以享受到聚变带来的好处，那么考虑到这些不发光的物质包含的粒子数量是普通物质的6倍，在那个局促狭小的早期宇宙中，大量不发光物质一定会大幅提高氢原子核的聚变率，最后生成的氦必然远远超过我们如今观测到的结果，宇宙诞生的过程也将发生巨变。

氦是一种顽强的原子核，它相对容易生成，但要让它聚合形成其他原子核却非常困难。恒星核内的聚变反应会不断地将氢制造成氦，与此同时，进一步的核聚变破坏的氦原子核数量相对少得多，所以我们或许可以认为，哪怕是在宇宙中那些氦原子核最稀少的地方，这种元素的数量也不会少于宇宙诞生之初的那几分钟。当然，就算恒星在消耗原料时极度克制，在它所属的星系内，氦元素在所有原子中的占比也有10%，我们从大爆炸献给宇宙的生日套餐中恰好可以推算出这个数字——只要当时那些暗物质不参与创造原子核的聚变反应。

所以，暗物质是我们的朋友。但天体物理学家在计算的时候必须以自己完全不理解的概念为基础，他们对此感觉不适也是可以理解的，虽然他们并不是第一次陷入这样的境地。早在19世纪，天体物理学家就测量了太阳的能量输出，那时候他们并不知道这些能量来自热核聚变，当时量子力学还没出现，关于微观物质的各种深刻洞见更是连影子都还没有，“聚变”这个概念根本就不存在。

不屈不挠的怀疑主义者或许会将今天的暗物质比作早已被证伪的“以太”。很长一段时间里，人们普遍认为，光在没有重量的透明以太中传播。物理学家觉得以太必然存在，虽然没有任何证据能证明这套假说，但它依然流行了几个世纪，直到1887年，阿尔伯特·迈克尔逊（Albert Michelson）和爱德华·莫雷（Edward Morley）在克利夫兰做了那个著名的实验。既然光是一种波，那它就应该需要某种传播媒介，就像声音需要空气作为传播媒介。不过后来我们发现，光在宇宙的真空中也可以高高兴兴地奔跑，不需要任何媒介的支持。声波实际上来自空气的振动，光波却和它不一样，光单靠自己就能传播。

但我们对暗物质的无知和对以太的无知有着本质的区别。以太不过是一个占位符，我们用它来填充尚不完善的理论，但暗物质不是虚无缥缈的假说，我们实实在在地观测到了它的引力对可见物质的影响。暗物质不是凭空创造的概念，而是我们基于观测结果做出的推测。暗物质和我们已经发现的100多颗系外行星一样真实——这些太阳系外行星发现的关键就是它们的引力对其宿主恒星造成的影响。最坏的结果无非就是物理学家（或者其他智者）最终发现，暗物质的成分根本就不是物质，而是别的东西，实际上他们也没有排除这样的可能性。暗物质会不会是另一个维度的力在宇宙中的投影？会不会是某个平行宇宙和我们的宇宙发生了交叉？然而，这些可能性不会改变暗物质引力在理论方程中的地

位，我们正在利用这些方程理解宇宙的形成和演化。

一些顽固不化的怀疑主义者可能会宣称“眼见为实”。眼见为实的生活哲学的确适用于很多地方，机械工程学领域用得上，钓鱼和约会的时候也用得上。显然，密苏里州的居民也深信这套哲学，但它真的不够科学。“眼见”绝不是科学的全部，科学的核心是测量——最好的测量工具不是你的眼睛，因为眼睛必然受到脑子的影响：你会先入为主，会做事后诸葛亮，会有未经其他数据验证的猜想，还有林林总总的偏见。

75年来，地球上的我们一直试图直接探测暗物质，对研究者来说，这就像某种形式的墨迹测验。有的粒子物理学家认为，暗物质的基本成分肯定是某些我们尚未发现的幽灵粒子，它通过引力和物质互动，除此以外它和物质或者光不会有任何相互作用，就算有也非常微弱。这个说法听起来有点疯狂，但类似的事情早有先例。比如说，我们早就知道中微子的存在，但它和普通物质以及光的相互作用都极其微弱。日核制造的每一个氦原子核都伴随着两个中微子，来自太阳的中微子以接近光速的速度在宇宙的真空中飞驰，然后畅通无阻地穿过地球，就像幽灵一样。想一想吧：无论是白天还是晚上，每一秒都有1000亿个来自太阳的中微子悄无声息地穿过你身上的每一平方厘米。

但捕捉中微子并非完全不可能。在极为罕见的情况下，中微子会通过天然的弱核力与物质互动。能捕捉到一个粒子，你自然就能探测它。我们不妨将行踪飘忽的中微子比作隐身人——同样的比喻也适合暗物质。“他”能穿过墙壁和门，就像“他”根本不存在一样。不过，既然隐身人拥有这样的能力，那“他”为什么没有穿过地板掉进地下室呢？

如果我们能制造出足够灵敏的探测器，粒子物理学家猜想的暗物质粒子或许就会通过类似的互动显露真容。它们也可能通过强核力、弱核力、电磁力以外的某种未知的力展示自己的存在。这三种已知的力（再加上引力）主宰着已知的所有粒子之间的互动。所以，我们的选择十分清晰。暗物质粒子一定在等待我们去发现，具体的方法无非两种：（1）发现并掌握一种或者一系列全新的力，它能和暗物质粒子产生互动；（2）继续提高测量的灵敏度，因为暗物质粒子青睐的可能还是我们熟知的这几种力，只是它们之间的作用非常非常微弱。

MOND理论的支持者在墨迹测试中没有看到全新的粒子。他们认为需要修正的是引力，而不是粒子，所以他们决定修正牛顿力学——虽然这个大胆的尝试似乎已经失败了，但毫无疑问，支持这条道路的先驱试图改变的是我们对引力的看法，而不是亚原子的人口普查数据。

还有一些物理学家追求的是万有理论（Theories Of Everything，TOE）。根据这套理论的一个衍生版本，我们的宇宙附近存在一个平行宇宙，我们只能通过引力与它互动。你永远不会接触到平行宇宙里的物质，但你可能会感受到它的拉力，这些力能够渗入我们这个宇宙的空间维度。想象一下，我们的宇宙有一个幽灵般的同伴，它只能通过引力彰

显自己的存在。这听起来相当新奇，简直不可思议，但想一想人类第一次听说地球绕太阳旋转时的情况，还有人类第一次听说太阳系在宇宙中并不孤独时的情况，你或许就不会这么大惊小怪了。

暗物质的影响真实存在。我们只是不知道暗物质到底是什么。它似乎不受强核力的影响，因此它无法形成原子核。我们也没有发现它受弱核力影响，所以它的行踪比中微子更难捉摸。它看起来也不会受电磁力影响，所以它不能制造分子，也不能吸收、释放、反射或者散射光。然而它却能产生引力，由此影响普通物质。事情就是这样。经过了这么多年的摸索，天体物理学家还是不知道，暗物质除了产生引力以外还能干什么。

宇宙背景辐射详图告诉我们，在宇宙诞生之初的那38万年里，暗物质必然已经存在。时至今日，我们依然需要银河系和星系团里的暗物质，否则我们就无法解释这些系统内部天体的运动。不过，从目前的情况来看，我们对暗物质的无知并未影响天体物理学前进的脚步。在探索宇宙的道路上，暗物质就像一位古怪的朋友，我们带着它一路前行，在需要它的时候恳求它为我们扶危解困。

我们希望，在不久的将来，我们可以逐渐学会利用暗物质——只要我们能搞清楚它的成分到底是什么。想象一下，暗物质可以帮助我们造出看不见的玩具、能够彼此穿透的车辆，或者超级隐形飞机。科学史上从来不乏起初看似莫名的发现，到头来总有聪明人会想出办法来利用这些知识，造福自己或者地球上的其他生灵。

第五章　要有更多暗

现在我们知道，宇宙中光与暗并存。所有我们熟悉的天体都沐浴在光中，无论是组成星系的数以十亿计的恒星，还是行星和更小的宇宙碎片。恒星以外的天体或许不会产生可见光，但它们的确会释放出其他形式的电磁辐射，例如红外线或无线电波。

目前我们发现，神秘的暗物质隐藏在宇宙的未知世界中，我们只能通过其引力对可见物质的影响感受到它的存在，对它的组成和性质一无所知。暗物质中有一小部分可能只是看不见的普通物质，但它们不会产生任何可探测的辐射。不过，正如我们在第四章中介绍的，绝大部分暗物质的成分必然不是普通物质，目前我们对其性质几乎一无所知，我们只知道暗物质有作用于可见物质的引力。

除了暗物质以外，宇宙中还隐藏着截然不同的另一种存在。它不存在于任何形式的物质内部，只存在于空间之中。我们将这个概念以及它蕴含的惊人结果归功于当之无愧的现代宇宙学之父——爱因斯坦。

第一次世界大战期间，改进款的新型机枪在柏林以西几百千米外的战场上对数万士兵大开杀戒，与此同时，爱因斯坦坐在德国首都的办公室里思考宇宙。战争伊始，爱因斯坦和一位同行一起发起了反战请愿，除了他们自己以外，他们还说服了另外两个人在请愿书上签名。这一举动破坏了爱因斯坦和其他科学家的关系，也彻底摧毁了这位同行的职业前途，因为当时大多数德国科学家都签了支持开战的请愿书。但爱因斯坦的人格魅力和科学声望让他能够继续在同侪面前保持尊严。他仍在努力寻找能够准确描述宇宙的方程。

战争还没结束，爱因斯坦就获得了成功——这可能是他职业生涯中最辉煌的一页。1915年11月，爱因斯坦提出了广义相对论，这套理论描述了空间和物质如何互动：物质告诉空间如何弯曲，空间告诉物质如何移动。牛顿认为引力是一种神秘的“远距离作用”，但爱因斯坦认为，引力来自空间构造的扭曲，它就发生在我们的眼皮子底下。举个例子：太阳会在空间中造出某种扭曲的“酒窝”，离太阳越近的地方，这种扭曲效应就表现得越明显。行星会不由自主地滚向酒窝深处，但在惯性的作用下，它们并未一路下坠，而是绕着公转轨道运动，在空间中与这个酒窝保持大体恒定的距离。爱因斯坦的理论公开发表后几周，物理学家卡尔·史瓦西（Karl Schwarzschild）从可怕的德国军旅生活中暂时抽身出来（在军中染上的恶疾没过多久就夺去了他的生命），利用爱因斯坦的理论推出了一个奇妙的现象：强引力物体会在空间中创造一个“奇点”。奇点周围的空间会将这个物体完全包裹起来，包括光在内的任何东西都无

法穿透这层铁幕。这样的物体就是我们今天所说的黑洞。

在广义相对论的引导下，爱因斯坦找到了他苦苦寻觅的关键方程，这个方程将宇宙中的物体及其整体行为联系到了一起。爱因斯坦独坐在办公室里研究这个方程，在脑子里构建各种各样的宇宙模型，当时他几乎发现了宇宙正在膨胀，但直到十几年后，埃德温·哈勃（Edwin Hubble）的观测结果才真正揭开了宇宙的这个秘密。

根据爱因斯坦的基本方程，在一个物质大致均匀分布的宇宙中，空间不可能是“静态”的。宇宙不可能“静静待在原地”，虽然我们的直觉和一个时期内的天文观测结果都指向这个结论。作为一个整体，空间必然有所动作，要么一直膨胀，要么一直坍缩。空间类似吹胀或者泄气的气球，它绝不是一个大小恒定的气球。

这让爱因斯坦深感忧虑。有一段时间，就连这位藐视权威、从不惮于质疑传统物理理论的勇士也觉得自己可能走得太远了。没有任何天文观测结果能证明宇宙正在膨胀，因为当时天文学家只记录近处的恒星运动，从未测量过如今我们称之为星系的那些遥远天体和地球之间的距离。爱因斯坦并没有对外公布宇宙膨胀或坍缩的计算结果，他回过头审视自己的方程，试图另辟蹊径，将宇宙“固定”下来。

很快他就找到了一条路。爱因斯坦的基本方程里有一个具体数值未知的常数，它代表真空中每立方厘米空间包含的能量。当时谁也无法确定这个常数的值，所以最开始，爱因斯坦将它设定为0。他在另一篇科学论文中提出，如果这个常数（后来的宇宙学家将它命名为“宇宙常数”，cosmological constant）有一个特定的值，那么空间也可能是静态的。这样一来，他的理论和观测结果之间的冲突消弭于无形，爱因斯坦也能安心相信自己的方程了。

但麻烦接踵而至。1922年，一位名叫亚历山大·弗里德曼（Alexander Friedmann）的俄国数学家证明了爱因斯坦的静态宇宙必然是不稳定的，就像架在支点上的铅笔，最轻微的涟漪或扰动都会导致空间膨胀或坍缩。刚开始，爱因斯坦宣称弗里德曼肯定弄错了，不过后来，他发表文章收回了这一指控，并肯定了弗里德曼的计算结果。对这位伟大的科学家来说，如此大方的举动绝不鲜见。20世纪20年代末，哈勃发现宇宙的确在膨胀，爱因斯坦愉快地接受了他的结论。根据伽莫夫的回忆，爱因斯坦毫不讳言宇宙常数是他犯下的“最大的错误”。虽然少数几位宇宙学家还在顽固地试图利用非零（但不是爱因斯坦使用过的1）的宇宙常数来解释某些令人困惑的观测结果，但他们的理论后来都被证伪了：宇宙其实根本不需要这个常数，对于这样的结果，全世界科学家不无解脱地叹了口气。

当时他们的确这样以为。不过到了20世纪末，宇宙论的故事再起波澜，1998年，人们惊讶地发现，宇宙常数的值真的不是0。看似空旷的空间中包含着能量，我们称之为“暗能量”，这种能量非同寻常的特质决

定了整个宇宙的未来。

要理解（甚至相信）这套匪夷所思的理论，我们必须回顾哈勃发现宇宙膨胀之后宇宙学家思考的关键问题。爱因斯坦的基本方程允许空间曲率存在，用数学语言来描述，就是空间曲率可能是正值，也可能是0或者负值。零曲率对应的是“平坦空间”，也就是我们凭直觉认定的宇宙面貌：绝对的平面朝所有方向无限延展，就像一块无限大的黑板。与此相对，曲率为正的空间像个球面，我们可以通过第三个维度看到二维空间的弯曲。请务必注意球体的中心，无论二维空间是膨胀还是收缩，球心始终保持静止，它存在于第三个维度中，不会出现在代表所有空间的二维面上。

任何曲率为正的表面所包含的区域都是有限的，与之类似，正曲率空间包含的体积同样有限。在一个曲率为正的宇宙里，从地球出发，只要走得够远，你总能回到起点，就像麦哲伦的环球航行一样。但负曲率空间却能无限延展，虽然它并不平坦。负曲率二维空间就像一个无限大的马鞍表面：它在一个方向（从前到后）“向上”弯曲，而在另一个方向（从左到右）“向下”弯曲。

如果宇宙常数等于0，那么我们只需要两个参数就能描述宇宙的所有特性。其中一个参数名叫“哈勃常数”（Hubble constant），它描述的是目前宇宙膨胀的速度；另一个参数描述的则是空间的曲率。20世纪下半叶，几乎所有宇宙学家都相信宇宙常数的值为0，那么他们的第一要务自然是测量宇宙膨胀的速度和空间的曲率。

只要能准确测量遥远天体远离我们的速度，我们就能算出这两个常数。哈勃常数等于天体远离地球的速度除以它和我们之间的距离（离我们越远的星系“后退”的速度越快），这个常数的值非常非常小，所以只有在观测那些非常遥远的天体时，我们才能发现空间的弯曲。天文学家在观测那些距离银河系数十亿光年的天体时，他们实际上也在回望宇宙的往昔。他们看到的不是宇宙的现在，而是那个离大爆炸更近的年代。通过观测距离银河系50亿光年甚至更远的星系，宇宙学家重新构建了这个膨胀的宇宙的历史。重要的是，他们能够看到宇宙膨胀的速度如何随时间而变化——这是确定空间曲率的关键。至少从理论上说，这是一种有效的办法，因为空间弯曲的程度会让过去几十亿年宇宙膨胀的速度发生微妙的变化。

然而在实践层面上，天体物理学家还是解决不了这个问题，因为他们无法准确估计那些几十亿光年外的星系与地球之间的距离。不过他们的箭囊里还有另一支利箭。如果能够测量宇宙中所有物质的平均密度（平均每立方厘米的空间中有多少克物质），他们就能把这个数拿来

与“临界密度”（critical density，出自爱因斯坦的宇宙方程）进行比较。临界密度描述的是维持零曲率空间所需的确切宇宙密度值。如果宇宙的实际密度高于这个值，那么空间曲率为正。在这种情况下，假设宇宙常数为0，那么我们的宇宙最终会停止膨胀，转而开始坍缩。但是，如果宇宙的实际密度等于或低于临界密度，那么宇宙就将永远膨胀下去。要是实际密度正好等于临界密度，那么空间曲率为0；要是实际密度小于临界密度，空间曲率就成了负数。

到20世纪90年代中期，宇宙学家发现，就算把目前（通过对可见物质产生的引力）探测到的所有暗物质都算进来，宇宙中的物质密度也只有临界值的四分之一左右。这个结果不算出乎意料，它意味着宇宙永远不可能停止膨胀，而且我们生活其中的空间必然拥有一个负的曲率。但理论派宇宙学家却深受伤害，因为他们一直坚信，空间曲率一定是0。

他们的信念来自宇宙的“暴胀模型”（inflationary model），它（毫不令人意外地）诞生于一个消费者价格指数急剧上涨的年代。1979年，加州斯坦福直线加速器中心的物理学家阿兰·古斯（Alan Guth）提出，在宇宙诞生的极早期，它经历过一个急速膨胀的阶段——物质远离彼此的速度越来越快，甚至远超光速。然而根据爱因斯坦的狭义相对论，光速不是宇宙中所有物体运动速度的上限吗？其实这个说法不完全准确。爱因斯坦理论中的光速上限只适用于物体在空间中的运动，但无法限制空间本身的膨胀。在大爆炸之后10-37秒到10-34秒的“暴胀时期”，整个宇宙的膨胀系数大约是1050。

是什么造成了这样的暴胀？古斯提出，所有空间一定经历了某种“相变”，这一过程类似液态水在短时间内冻结成冰。苏联、英国和美国的同行对古斯的假说做出了一些关键的修正，从此以后，这套假说大行其道，在之后的20年里，它一直是主流的极早期宇宙理论模型。

暴胀理论为何如此诱人？因为暴胀时期的存在很好地解释了宇宙为什么是各向同性的：我们能看到的所有东西（以及其他很多东西）都由一小块空间膨胀生成，这块原生空间的固有特性也因此变成了全宇宙共同的特征。暴胀理论还有其他一些深受宇宙学家青睐的优点，我们现在暂不赘述；最重要的是，暴胀模型提出了一个直接的、可验证的预测：宇宙中的空间应该是平坦的，它的曲率既不是正数也不是负数，恰恰就是零，这完全符合我们的直觉。

根据这一理论，宇宙的平坦性源自暴胀时期的急速膨胀。我们不妨想象一下，你站在一个气球表面，让这个气球膨胀很多很多倍——1后面的0多得数不清。经历了这样的膨胀，气球表面你能看到的部分肯定会平得像煎饼一样。宇宙中的空间也遵循同样的原理——如果暴胀模型真的能描述现实中的宇宙的话。

刚才我们说过，要获得平坦的空间，宇宙中的物质必须达到临界密度，但现在我们计算的物质密度加起来也只能达到这个值的四分之一左右。20世纪80年代到90年代，很多理论派宇宙学家坚信，暴胀模型不可能出错，因此他们需要新的数据来弥合宇宙“质量差”，填平我们实际计算的物质总密度（它意味着空间曲率为负）和临界密度（平坦宇宙所需的必要条件）之间的鸿沟。这样的信念推动他们坚定地继续前行，尽管观测派宇宙学家总是嘲笑他们对理论分析的盲从。然后，嘲笑声突然消失了。

1998年，两个相互竞争的天文学家团队宣布了一些新的观测结果，这些数据意味着宇宙常数的值不是0——当然，也不是爱因斯坦为了获得静态宇宙而采用的那个值，而是完全不同的另一个数，这意味着宇宙将以越来越快的速度永远膨胀下去。

如果这些数据仅仅是理论家构建另一套宇宙模型的工具，那它恐怕不会引发太多关注。但事实上，新数据来自声誉卓著的专家对真实宇宙的观测，这就完全是另一回事了。尽管如此，这些惊世骇俗的数据仍引发了诸多质疑，这两组天文学家狐疑地审视竞争对手的一切可疑举动，结果却发现，他们完全认同这些数据及其解释。新的观测结果不仅暗示宇宙常数的值绝不是0，还赋予了它一个能让空间变得平坦的值。

宇宙常数让空间变平是什么意思？那岂不是像《爱丽丝漫游奇境》里的红桃皇后说的那样，我们每个人在早餐前都要相信六件不可能的事情？不过，要是再想深一层，你或许会认同这个结果。如果看似空无一物的空间中蕴藏着能量，那么根据爱因斯坦那个著名的方程$E=mc^2$，这些能量必然对宇宙的总质量做出贡献。一定值的能量等同于一定值的质量，只是需要根据质能方程除以一个光速的平方。这样一来，宇宙的平均密度就应该等于物质贡献的密度加上能量贡献的密度。

与临界密度对比的时候，我们必须采用这个新的总密度。如果二者相等，空间就必然是平的。暴胀模型对平坦宇宙的预测由此得到了满足，它可不在乎空间的总密度到底是来自物质、能量，还是二者之和。

证明宇宙常数非零进而引出暗能量的关键证据来自天文学家对一种特定类型的爆炸恒星（或者说超新星）的观测，这些恒星在惊天动地的爆炸中完成了死亡的华丽谢幕。这种类型的超新星被命名为“Ia型超新星”，或者“SN Ia”，以区别于其他类型的超新星。一般来说，巨型恒星燃烧殆尽，无法通过任何形式的核聚变继续产生能量的时候，恒星核就会坍缩，制造出超新星。但Ia型超新星的原型却是双星系统中的白矮星。如果两颗恒星诞生的位置靠得太近，那么它们一生都会在同一条公转轨道上绕着这个系统共同的质心旋转。如果其中一颗恒星的质量比另

一颗大，它在壮年期的运行速度就会比另一颗恒星快，接下来，它通常会失去外面的数层气体，暴露出来的恒星核就是萎缩简并的“白矮星”。白矮星的尺寸不会超过地球，但它包含的质量却和太阳相当。物理学家之所以会说白矮星内部的物质处于“简并态”，是因为它的密度极高（相当于铁或者金的数十万倍），量子力学效应作用于宏观物质，白矮星不会被自身的巨大引力压垮。

共同轨道上的伴星日渐衰老，白矮星会不断吸收它的逃逸气体。这些材料的氢含量相对较高，日积月累，白矮星的密度和温度也会稳定增长。最后，等温度升高到1000万摄氏度，整颗白矮星就会再次被核聚变点燃，这样的爆炸——原理类似氢弹，但爆炸强度是氢弹的几万亿倍——会将白矮星彻底撕碎，形成Ia型超新星。

Ia型超新星是天文学家的好帮手，因为它拥有两种不同的特质。首先，它会制造出宇宙中最璀璨的超新星爆炸，这样的光芒跨越数十亿光年的距离仍清晰可见。其次，白矮星的质量有天然的上限，大约是太阳质量的1.4倍。只要堆积在白矮星表面的物质使得整个天体的总质量达到了这个上限，猛烈的核聚变就会撕裂白矮星——这样的爆炸在宇宙中遍地开花，爆炸的天体其质量和成分都一模一样。因此，这种类型的所有超新星对外输出的峰值能量几乎完全相同，亮度达到峰值以后，它们消失的速度也相差无几。

Ia型超新星的这些特性为天文学家提供了亮度极高、易于辨认的“标准烛光”，即无论出现在哪里能量输出峰值都保持不变的天体。当然，这些超新星与地球的距离会影响我们观测到的亮度。如果两个相距遥远的星系里各有一颗Ia型超新星，那么它们到地球的距离完全相同，我们才能观测到同样的最大亮度。如果其中一颗超新星与地球的距离是另一颗的两倍，那么在我们眼中，它的最大亮度只有另一颗的四分之一，因为我们观测到的天体亮度与距离的平方成反比。

基于天文学家对每颗Ia型超新星光谱的深入研究，一旦他们学会了如何识别这种超新星，那无异于握住了一把准确测量距离的金钥匙。只要能（通过其他方式）确定最近的那些Ia型超新星与地球之间的距离，他们就能估算这种类型的其他超新星离我们到底有多远，只需要简单地比较远近超新星的亮度。

整个20世纪90年代，哈佛大学和加州大学伯克利分校的两组超新星专家都在优化这种测量技术。根据超新星的光谱暴露的细节，他们想出了一些办法来补偿不同的Ia型超新星之间细微但确实存在的差异。要利用这把新铸的钥匙来测量遥远的超新星离我们有多远，研究者需要一台能以极高的精确度观测远方星系的望远镜，于是他们的目光落到了哈勃太空望远镜（Hubble Space Telescope）上，1993年，这台望远镜通过翻修校正了形状错误引起的主镜片误差。超新星专家利用地面望远镜找到了数十亿光年外的几十颗超新星，然后再通过哈勃望远镜深入研究这些新发现的超新星。遗憾的是，他们只能争取到哈勃望远镜的一小部分

观测时间。

20世纪90年代末，两个超新星观测团队的竞争进入了白热化阶段，双方都想抢在对方前面绘制出扩充版的新“哈勃图”（Hubble diagram），在宇宙学研究领域，这张图是确定星系距离及其后退速度的关键所在。天体物理学家利用多普勒效应（详见第十三章）来计算星系的后退速度，我们观测到的星系颜色取决于它的后退速度。

每个星系与地球之间的距离和它的后退速度最终会化作哈勃图上的一个点。对于相对较近的星系来说，这些点迈着整齐划一的步伐稳定上扬，如果某个星系和地球的距离是另一个星系的两倍，那么它后退的速度也是后者的两倍。星系距离与后退速度之间直接的比例关系体现在哈勃定律（Hubble's law）的代数表达式中，这个简单的方程描述了宇宙的基本行为：$v=H_0\times d$。其中v代表星系的后退速度，d代表星系与我们之间的距离，H_0则是一个通用常数，我们称之为“哈勃常数”。在任意给定的时间点，整个宇宙的哈勃常数都恒定一致。无论外星观测者出现在宇宙中的什么地方，只要他们研究的是大爆炸140亿年后的这个宇宙，那么他们观测到的星系后退速度必然符合哈勃定律，他们算出的哈勃常数的值也必然和我们的一样，只不过他们大概会给这个常数起个别的名字。这样的“宇宙民主主义”是整个现代宇宙学暗含的假设，但我们无法证明宇宙真的这么民主。也许在我们看不见的星空深处，宇宙的行为和我们现在观测到的完全不同。不过宇宙学家断然否认了这样的可能性，他们认为，至少我们能观测到的宇宙都遵循同样的规则。在这种情况下，$v=H_0\times d$ 就是全宇宙通用的定律。

但是，随着时间的流逝，哈勃常数的值可能发生变化，事实也的确如此。纳入了数十亿光年外遥远星系的改进版新哈勃图不仅能告诉我们哈勃常数H_0（代表星系距离与后退速度的点在哈勃图上连成一条直线，哈勃常数的值就是这条直线的斜率）现在的值，还能揭示宇宙目前的膨胀速度与数十亿年前有何区别。后面这个值来自哈勃图最上方的那些点，它们代表着我们能观测到的最遥远的星系。因此，包含了数十亿光年外那些星系的新版哈勃图将揭示宇宙膨胀的历史，告诉我们宇宙膨胀的速度发生了怎样的改变。

为了达成这个目标，天体物理学界为这两支相互竞争的超新星观测团队投入了海量资源。1998年2月，他们首次发布的观测结果彻底推翻了学界广泛接受的宇宙模型，由此激起了任何一个团队都无法承受的怀疑浪潮。由于两个团队主要的怀疑目标都是对方，所以双方都在殚精竭虑地给对方的数据和解释挑错。等到这两组科学家终于放下偏见承认对手的确无懈可击时，宇宙学界也别无选择，只能不太情愿地接受来自太空边疆的最新消息。

这些新消息到底是什么？其实很简单：那些最遥远的Ia型超新星比我们预想的更暗一点。这意味着那些超新星与地球的距离比我们预想的更远，也就是说，某种力量让宇宙膨胀的速度变快了一点。这样超出常

规的膨胀来自何方？唯一的嫌犯就是潜伏在真空中的“暗能量”——这些能量的存在赋予了宇宙常数一个非零的值。通过测量那些遥远超新星的亮度与理论值之间的偏差，两组天文学家看到了宇宙的形状和命运。

两组超新星专家达成了共识：宇宙的确是平的。要理解这个问题，我们就得讲点儿高深的东西了。如果宇宙常数非零，那么要描述这个宇宙，我们需要第三个数。现在我们需要给哈勃常数（它的现值记作H_0）和物质平均密度（如果宇宙常数为0，那么单凭这一个参数就能决定空间曲率）都加上暗能量提供的等效质量——根据爱因斯坦方程$E=mc^2$，我们必须考虑暗能量的等效质量（m），因为它拥有能量（E）。宇宙学家将物质密度记为Ω_M，暗能量密度记为Ω_Λ，Ω则是宇宙密度与临界密度的比值。Ω_M代表宇宙中所有物质的平均密度与临界密度之比，而Ω_Λ代表暗能量提供的等效密度与临界密度之比。Λ在这里代表宇宙常数。平坦宇宙的空间曲率为零，Ω_M与Ω_Λ之和恒定为1，因为宇宙的总密度（真正的物质密度与暗能量提供的等效物质密度之和）正好等于临界密度。

对遥远Ia型超新星的观测结果衡量的是Ω_M与Ω_Λ之间的差值。物质会拖慢宇宙的膨胀，因为引力总是倾向于将所有东西拉到一块儿。物质的密度越大，这种“拖后腿”的效应就越明显。但暗能量的表现却完全不同。普通物质互相拉扯，拖慢了宇宙膨胀的步伐，但暗能量却拥有一种古怪的特性：它会促使空间扩张，从而加快宇宙的膨胀速度。随着空间的膨胀，更多暗能量凭空出现，这个膨胀的宇宙就像终极版的免费午餐。新的暗能量又会进一步加速宇宙的膨胀，所以随着时间的流逝，免费的午餐变得越来越大。Ω_Λ的值衡量的是宇宙常数的大小，它也代表着暗能量促使宇宙膨胀的力量量级。天文学家测量了星系距离与后退速度之间的关系，由此确定了聚拢一切的引力与推开一切的暗能量之间这场“拔河比赛”的结果。他们的测量结果表明，$\Omega_\Lambda - \Omega_M = 0.46$，误差正负0.03。由于天文学家早已算出，$\Omega_M$的值大约是0.25，那么$\Omega_M$的值大约就是0.71。这样一来，$\Omega_\Lambda$与$\Omega_M$之和达到了0.96，差不多正好符合暴胀模型的预测。近年来的新成果又进一步提高了这两个值的精确度，现在它们的和更接近1了。

虽然两组相互竞争的超新星专家达成了共识，但一部分宇宙学家仍有疑虑。科学家抛弃终身信念这种事儿肯定不是天天都有，他们曾经坚信宇宙常数应该是零，可现在的观测结果却强塞给了他们另一个截然不同的结论：暗能量充斥着每立方厘米的真空。不过，在消化了一颗卫星提供的新的观测数据以后，所有的怀疑者几乎都打消了疑虑。这颗重要的卫星就是我们在第三章中介绍过的WMAP，它的设计运转目标是以前所未有的精确度观测宇宙背景辐射。2002年，WMAP开始输出有用的观测结果，到2003年年初，宇宙学家已经利用它积累的有效数据绘制出了整个天空的地图，根据这张图，我们确定了宇宙背景辐射主要处于微波频段。虽然以前的观测结果得出的基本论断和这幅新图差别不大，但当

时他们观测的要么只是一小片天空，要么没有这么详细精准。WMAP的全天地图是天文学家测量宇宙的最高成就，它确定了宇宙背景辐射那些最重要的性质。

这幅地图最令人震惊也最重要的特性在于，它几乎完全是平滑的，天文学家之前的局部观测也得出了同样的结论，包括利用气球搭载的仪器测得的数据和WMAP的前身COBE（COsmic Background Explorer，宇宙背景探测者）卫星的观测结果。来自所有方向的宇宙背景辐射不存在可测量的强度差异，我们将测量精确度提高到千分之一，才会发现以某个特定方向为中心的辐射强度比其他地方略高，与此同时，来自相反方向的辐射强度略低于平均水平。这样的差异源于我们的银河系相对于周围星系的运动。在多普勒效应的作用下，我们测得的“迎面而来”的辐射会比其他方向的略强一点，但这并不是因为这个方向的辐射真的更强，而是因为我们和这个方向的宇宙背景辐射（CBR）相向而行，这样的运动导致我们探测到的光子能量增强了一点。

一旦修正了多普勒效应的影响，我们就会发现，宇宙背景辐射非常平滑，除非我们再将测量精确度提高到十万分之一。在这样的精确度下，平滑的宇宙背景辐射地图终于出现了一点起伏。我们发现，来自某些位置的CBR比其他地方偏强或者偏弱了一点点。如前所述，这样细微的辐射强度差异意味着，在大爆炸38万年后的那个时刻，与整个宇宙的平均值相比，某些位置的物质更热、更密集一点，或者更冷、更稀疏一点。COBE卫星首先发现了这样的差异；气球搭载的仪器和南极观测站又进一步提高了观测数据的精确度；直到最后，WMAP卫星提供了更精确的全天观测数据，宇宙学家借此绘出了宇宙背景辐射强度的详细地图，它的角分辨率达到了前所未有的1度左右。

COBE和WMAP在平滑的宇宙背景辐射中发现的轻微起伏激起了宇宙学家的兴趣，但它的意义绝不仅限于此。首先，它让我们得以一窥宇宙背景辐射停止与物质互动那一刻的宇宙结构。当时物质密度略高于平均水平的区域赢得了进一步收缩的先机，它的引力成功吸引了更多物质。因此，这幅描绘各个方向CBR强度的新地图最重要的意义在于，它验证了宇宙学家提出的理论：我们如今看到的宇宙疏密不一，不同的区域聚集的物质数量差别巨大，这样的差异在大爆炸后的几十万年里就埋下了种子。

除此以外，宇宙学家还能利用宇宙背景辐射观测的新结果来研究另一个更基本的宇宙特性：透过CBR强度地图，我们甚至能看到空间本身的曲率，因为弯曲的空间会影响从中经过的辐射。举个例子，如果空间曲率为正，那么在观测宇宙背景辐射的时候，我们就像是站在北极的观测者，沿着地球表面向南眺望，试图研究来自赤道附近的辐射。由于所有经线都向着北极点汇集，我们观测到的辐射源会比平面上的略宽一点。

要理解空间曲率如何影响宇宙背景辐射的特征角度尺寸，我们不妨

想象一下，这些辐射终于停止与物质互动那一刻的情景。宇宙学家可以算出当时宇宙中可能存在的不平滑区域的最大尺寸：它的跨度应该等于当时的宇宙年龄乘以光速，也就是38万光年左右。这个值代表着粒子有能力影响彼此、制造起伏的最大距离。如果超出这个距离，粒子的“消息”根本来不及传过去，所以远方的起伏自然和它无关。

那么时至今日，这些最大的不平滑区域在天空中占据的角度到底有多大呢？这取决于空间的曲率，我们可以通过Ω_M与Ω_Λ之和来确定这个值。二者之和越接近1，空间曲率就越接近0，我们在CBR中看到的不平滑区域占据的角度也就越大。两个Ω值之和是决定空间曲率的唯一参数，因为这两种类型的密度影响空间曲率的方式完全相同。超新星观测测量的是Ω_M与Ω_Λ之差，而宇宙背景辐射观测直接测量了Ω_M与Ω_Λ之和。

WMAP提供的数据表明，CBR中最大的不平滑区域占据的角度大约是1度，这意味着Ω_M与Ω_Λ之和大约等于1.02，误差正负0.02。因此，考虑到实验精确度误差，我们或许可以认为$\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$，这意味着空间是平坦的。通过对遥远的Ia型超新星的观测，我们知道了$\Omega_\Lambda - \Omega_M = 0.46$。两个方程联立，最终我们发现$\Omega_M = 0.27$，$\Omega_\Lambda = 0.73$，当然，这两个值都有微小的误差。如前所述，这就是目前天体物理学家为这两个宇宙参数估测的最精确的值，这两个数告诉我们，物质包括普通物质和暗物质，两者对宇宙整体能量密度的贡献占27%，暗能量贡献了剩下的73%（如果你更喜欢用能量的等价物——物质——来表达的话，根据质能方程，我们也可以说，暗能量提供了73%的宇宙质量）。

很久以前，宇宙学家就知道，如果宇宙常数不是0，那么随着时间的流逝，物质和暗能量的力量对比必然发生巨大的变化。从另一方面来说，平坦的宇宙将永远保持平坦，从大爆炸开始直到无限远的未来。在一个平坦的宇宙中，Ω_M与Ω_Λ之和永远等于1，如果其中一个数发生变化，另一个数必然随之改变。

在大爆炸之后短暂的时期内，暗能量几乎不会对宇宙产生任何影响。和后面的年代相比，当时存在的空间过于狭窄，Ω_Λ的值只比0高一点点，Ω_M的值也只比1小一点点。在那个遥远的年代，宇宙的行为和宇宙常数为0时的情况几乎没有区别。但是，随着时间的流逝，Ω_M的值稳步下降，Ω_Λ的值也随之增长，二者之和始终为1。直到千亿年后的某一天，Ω_M的值最终将无限趋近于0，Ω_Λ的值也无限趋近于1。因此，在这个宇宙常数非零的平坦宇宙中，物质和暗能量将经历此消彼长的变化：最开始暗能量几乎不起作用；然后是“现在”这个阶段，Ω_M与Ω_Λ的值大体相当；直到遥远的未来，宇宙空间中的物质越来越稀薄，Ω_M无限趋近于0，但两个Ω值之和永远等于1。

现在，根据我们对星系团的观测，Ω_M的值大约是0.25。与此同时，CBR和远方的超新星也告诉我们，这个值大约是0.27。考虑到实验精确度误差，这两个值基本是一回事。如果我们生活的宇宙真的拥有一个非零的宇宙常数，如果这个宇宙常数真的（和物质一起）创造出了暴胀模

型所预测的平坦宇宙，那么这个宇宙常数的值必然导致Ω_Λ的值超过0.7、达到Ω_M的2.5倍左右。换句话说，要让Ω_M与Ω_Λ之和等于1，现在一大半的担子必然落到Ω_Λ头上。这意味着我们早已度过了物质和暗能量势均力敌（二者各占50%），共同维持宇宙平坦的年代。

在不到10年的时间里，Ia型超新星观测和宇宙背景辐射观测双管齐下，暗能量也从爱因斯坦的狂想变成了客观存在的物理现实。除非能证明这些观测结果不准确、解读有误或者干脆就是错的，否则我们必须接受这个结果：我们的宇宙永远不会坍缩，也不会循环。摆在我们面前的未来冷酷而荒芜：千亿年后，等到大多数恒星燃烧殆尽，除了最近的那些星系以外，所有事物都会消失在我们的视野尽头。

等到那时候，银河系将与邻近的星系合为一体，产生一个巨型星系。我们的夜空中只剩下绕轨运行的恒星（包括死去的和活着的），除此以外别无他物，未来的天体物理学家只能看到一个蛮荒的宇宙。没有星系可供他们追踪宇宙膨胀，最终他们将和爱因斯坦一样得出错误的结论：我们生活在一个静态的宇宙中。在宇宙常数和暗能量的推动下，宇宙的演化最终会导致我们再也无法测量这两个参数，甚至无法想象它们的存在。

所以，尽情享受宇宙学吧，趁我们还有机会。

第六章　一个宇宙还是多个宇宙

1998年年初，来自超新星的观测结果震撼了整个宇宙学界，这些数据表明，我们生活在一个膨胀的宇宙中，而且它膨胀的速度还在不断增长。不久后，对宇宙背景辐射的详细观测又进一步确认了宇宙加速膨胀的事实。时至今日，为了弄清宇宙加速膨胀背后蕴含的意味，宇宙学家已经奋斗了好些年。两个重要的问题深深折磨着他们，同时也照亮了他们的梦想：是什么让宇宙加速膨胀？为什么宇宙膨胀的加速度正好是我们现在测量到的这个值？

对于第一个问题，最简单的解释就是把宇宙加速膨胀归因为暗能量的存在和非零的宇宙常数。这个加速度的值直接取决于每立方厘米内包含的暗能量：暗能量越多，它产生的加速度就越大。因此，只要宇宙学家能弄清暗能量来自何方，以及它的数量为什么正好是我们今天测量到的这个值，他们就可以宣布自己解开了宇宙的基本秘密——宇宙的"免费午餐"到底是什么。真空中的这些能量持续不断地促使宇宙越来越快地膨胀，在那遥远的未来，近乎无限的空间中将充斥着近乎无限的暗能量，物质的密度则稀释到了几近于无。

暗能量到底来自哪里？宇宙学家可以从粒子物理学的幽深世界里找到答案：如果我们认可目前的量子力学对物质和能量的描述，那么暗能量必然来自真空中的某些事件。量子力学是粒子物理学的根基，它提出的假设常常精确契合来自亚微观世界的观测结果，所以它获得了物理学家的广泛认同。根据量子力学的一部分理论，我们所谓的"真空"中其实充斥着"虚粒子"（virtual particle），这些小家伙的状态在存在与不存在之间频繁切换，所以我们永远不可能直接锁定它们，只能观察到它们产生的效果。那些喜欢创造物理术语的家伙给虚粒子持续不断的出现和消失起了个名字，叫作"真空的量子涨落"（quantum fluctuations of the vacuum），它将能量赋予了真空。此外，量子物理学家还能相对比较轻松地计算每立方厘米的真空中包含的能量。如果将量子力学直接应用于所谓的"真空"，我们就会发现，量子涨落必然创造出暗能量。从这个角度来说，关于暗能量的最大问题或许应该是：宇宙学家为什么花了这么长时间才意识到这种能量必然存在？

不幸的是，根据实际情况的细节，这个问题又变了副模样，我们现在要问：粒子物理学家为什么错得这么离谱？他们算出的每立方厘米真空包含的暗能量的值大约比我们根据超新星和宇宙背景辐射实际观测值得出的结果大120个数量级。对于那些特别遥远的天文环境，如果理论计算值和实际观测值的差距在10倍以内，我们就认为这样的结果可以接

受，哪怕只是暂时的，但再乐观的人也无法欣然接受120个数量级的差距。如果真空中包含的暗能量真有粒子物理学家算出来的那么多，那么宇宙早就膨胀到了不知道多大，我们也不用为这个问题头疼了，因为在这么多暗能量的作用下，只需要一点点时间，物质密度就会被稀释到超乎想象的地步。理论和观测结果的确达成了共识：真空中应该包含着暗能量，但这些能量到底有多少，理论值和观测值却差了十万八千里。这么巨大的数量级差异在地球上根本找不到类比，哪怕到宇宙去找也很困难。我们已知的最遥远的星系与地球之间的距离差不多比质子的尺寸大40个数量级，虽然这个数大得超乎想象，但宇宙常数理论值和实际值之间相差的倍数相当于这个数的立方。

很久以前，粒子物理学家和宇宙学家就知道，量子力学预测的宇宙常数值大得令人无法接受。但那时候他们以为宇宙常数的值是0，所以他们希望未来能发现某些新的解释，让理论公式中的正负条件相互抵消，从而巧妙地消灭这个问题。他们曾经利用类似的手法解决了另一个问题：虚粒子为可见粒子贡献了多少能量？现在，既然宇宙常数非零，找到抵消条件的希望也变得渺茫起来。如果真的存在这样的抵消条件，它必须通过某种方式近乎彻底地抵消我们如今算出来的这个大得恐怖的数值。可是现在，宇宙学家完全无法解释宇宙常数的理论值为什么这么大，在这种情况下，他们只能继续和粒子物理学家合作，根据宇宙常数的实际观测值来构建暗能量在宇宙中的产生机制。

杰出的宇宙学家和粒子物理学家一直致力于解释目前的观测值，但还没有任何人获得成功。这个问题点燃了理论界的战火和愤怒，因为这些理论家深知，要是有人能解释自然界到底通过什么方式把宇宙塑造成了我们今天看到的样子，那他一定会获得诺贝尔奖，更别提还有发现带来的无穷乐趣。不过除此之外，常常引发争议的还有另一个亟待解释的问题：我们通过等价质量测得的暗能量总值为什么和宇宙中物质贡献的能量总值大体相当？

我们可以换个说法，用代表物质密度和暗能量等价质量密度的两个Ω值来重新表述这个问题：为什么Ω_M和Ω_Λ的值大体相当，而不是其中一个数远大于另一个数？在大爆炸之后的第一个10亿年里，Ω_M几乎完全等于1，而Ω_Λ约等于0。最开始，Ω_M的值是Ω_Λ的几百万倍，然后变成了几千倍、几百倍。时至今日，在这个$\Omega_M = 0.27$、$\Omega_\Lambda = 0.73$的宇宙中，这两个值的数量级完全一样，而且Ω_Λ的值明显大于Ω_M。而在遥远的未来，到了500亿年以后，Ω_Λ的值将变成Ω_M的几百倍，然后是几千倍、几百万倍，直至几十亿倍。只有在大爆炸之后30亿年到500亿年的这段时间里，这两个值才会大体相等。

30亿年到500亿年的时间跨度这么漫长，现在我们正好处于这个阶段，这难道有什么不对吗？但从天文学的角度来说，几百亿年的时间其实非常短暂。天文学家通常采用对数来划分时间阶段，每个阶段的时间跨度相差10倍。最开始，宇宙的年龄达到了某个值，下一个阶段，它的年龄会增长10倍，再下一个阶段，再增长10倍，以此类推，直到永远，

每一个阶段与上一个阶段的时间跨度各有10倍的差距。比如说，大爆炸之后，我们从量子力学允许的最小的时间跨度开始计时，那么第一个时间节点是宇宙诞生后10^{-43}秒。每年大约有3000万（3×10^7）秒，那么从大爆炸之后的10^{-43}秒到30亿年，我们大约需要乘以60个10。相比之下，从30亿年到500亿年只需要乘以1个10，在整个宇宙的漫长历史中，只有在这一个短暂的时期内，Ω_M和Ω_Λ的值大体相当。在此之后，无数个10将引导宇宙走向无限远的未来。所以如果采用对数纪年，我们就会发现，我们正好生活在这个Ω_M和Ω_Λ的值大体相当的年代，这样的可能性其实非常渺茫。美国的宇宙学带头人迈克尔·特纳（Michael Turner）将这个难解的谜题——我们为什么发现自己生活在这个Ω_M和Ω_Λ的值大体相当的时期——命名为“南茜·克里根问题”（Nancy Kerrigan problem），因为这位奥运滑冰运动员曾在遭受竞争对手的男友袭击后问道：“为什么是我？为什么是现在？”

尽管宇宙学家无法算出接近观测值的宇宙常数，但他们的确为克里根问题提供了一个答案，不过对于这个答案蕴含的意味和它的重要性，学界莫衷一是。有人真心欢迎它，有人只是勉强接受，有人仍在犹豫，还有人对它不屑一顾。这个解释将宇宙常数的值与客观的事实联系到了一起：我们生活在一个普通星系内绕着一颗普通恒星公转的行星上。根据这套理论，正是因为我们存在，所以那些描述宇宙的参数，尤其是宇宙常数，必然拥有一个允许我们存在的值。

我们不妨想象一下，如果宇宙常数的值比现在大得多，那会发生什么。如果暗能量的总量比现在大得多，那么只需要再过几百万年（而不是500亿年），Ω_Λ的值就将远远超过Ω_M。到那个时候，在那个暗能量加速效应占据主导地位的宇宙中，物质将飞速扩散，任何星系、恒星和行星都无法成形。假设从物质团首次成形到生命起源至少需要10亿年时间，那么我们就会得出这样的结论：我们的存在将宇宙常数的值限制在了0到现值的几倍之间，同时排除了任何更高的值存在的可能性。

如果我们和很多宇宙学家一样相信，我们称之为宇宙的所有事物都属于一个大得多的“多重宇宙”，那么这套理论的吸引力就会变得更强。多重宇宙包含了无数个互不影响的宇宙。根据多重宇宙的概念，事件的所有状态都嵌在更高的维度中，所以我们这个宇宙中的空间完全不可能接触到其他宇宙。由于多重宇宙的假设从理论上排除了各个宇宙发生互动的可能性，我们显然无从验证它的真实性，自然也就不可能去证明它——除非有哪个更聪明的天才能想出办法来测试多重宇宙模型。在多重宇宙的世界里，新宇宙的诞生完全是随机的，它有可能膨胀到无限大，即便如此也绝不会干扰其他无数个宇宙。

多重宇宙中的每一个新宇宙都拥有自己的物理规则和宇宙参数，其中包括那些能够决定宇宙常数值的参数。其他很多宇宙的宇宙常数比我们的大得多，它们会加速膨胀到近乎0密度的状态，这样的宇宙对生命当然很不友好。多重宇宙中只有一小部分（可能近乎无穷小）宇宙能提供允许生命存活的条件，因为只有这些宇宙的参数能让物质聚集生成星

系、恒星和行星，并允许这些天体存在数十亿年。

这种解释宇宙常数值的方法被宇宙学家命名为“人择原理”（anthropic principle），不过更恰当的名字或许应该是“人择方法”。这种解释宇宙学关键问题的方法具有很强的感染力：人们要么爱它，要么恨它，很少有人保持中立。和其他很多有趣的想法一样，人择方法可以方便地应用于各种神学和目的论的宏伟精神框架。某些笃信宗教的原教旨主义者发现，人择方法完全可以支持他们的信仰，因为它赋予了人类最核心的角色：如果没有观察者，宇宙——至少是我们所知的这个宇宙——将不可能存在。所以，这个一切都刚刚好的世界一定是某种更高级的力量为我们创造出来的。反对者会提出，这违背了人择方法的真意；从神学层面上说，如果这位上帝真的存在，那他必定是最浪费的造物主，因为他创造了数不清的宇宙，但生命却只能诞生在其中一个宇宙的一小片区域里。我们不如跳过“人择方法”，继续相信那些以人类为中心的更古老的创世神话。

从另一方面来说，如果你和斯宾诺莎一样相信上帝存在于一切事物之中，那你肯定无法抗拒这个拥有无数宇宙的多重宇宙。和大部分最前沿的科学理论一样，多重宇宙的概念和人择方法能够做出各种各样的解释，轻而易举地满足不同信仰系统的需求。目前来看，很多宇宙学家发现，多重宇宙能够游刃有余地包容任何信仰系统，而且不会与之发生任何实质性的联系。剑桥大学天文系的霍金和前辈牛顿一样坐拥卢卡斯教授席位，他认为人择方法完美地解决了克里根问题。斯蒂芬·温伯格（Stephen Weinberg）曾因量子物理学方面的洞见荣获诺贝尔奖，他不喜欢人择方法，但他也赞同这个假设，因为除此以外找不到其他更合理的解释，至少目前如此。

也许历史最终会告诉我们，现在的宇宙学家完全搞错了重点，因为我们现在拥有的知识根本不足以探讨这个问题。温伯格喜欢拿约翰内斯·开普勒（Johannes Kepler）的事迹来类比：开普勒穷尽毕生精力，试图解释太阳为什么拥有六颗行星（当时的天文学家都这样以为），以及这些行星为什么会沿着现在的轨道运转。然而直到400年后的今天，天文学家对行星的起源依然所知甚少，所以我们到现在还没弄清太阳系内行星的确切数量以及它们的轨道。按照开普勒的假设，行星公转轨道围绕太阳依次排列，五个大小不一的正多面体完美地嵌在两条相邻的轨道之间。现在我们倒是知道，这套假设毫无道理，因为多面体的嵌套并不完美，而且（更重要的是）我们找不到任何理由来解释行星轨道为什么会遵循这样的规则。我们的后代或许会认为，今天的宇宙学家就像开普勒一样，鲁莽地试图用少得可怜的知识来解释复杂神秘的宇宙，这样的努力注定徒劳无功。

并不是所有人都喜欢人择方法。有的宇宙学家谴责说，人择方法是一种失败主义论调，它无视历史（物理学家经过长期的努力，最终成功解释了曾经神秘的现象，这样的例子不绝于史，人择方法实质上否认了这些成功的案例），而且非常危险，因为人择方法蕴含着这样的意味：

我们的宇宙是由某种有智慧的存在设计出来的。除此以外，按照这套假设，我们生活在一个包含了无数宇宙的多重宇宙中，但哪怕从理论上说，我们也不可能接触其他宇宙，很多宇宙学家根本不能接受将这样的假设作为整个宇宙学的根基。

关于人择原理的争辩让我们清晰地看到，宝贵的怀疑主义为我们理解宇宙的科学方法奠定了根基。某个理论或许特别吸引某位科学家，尤其是提出这套理论的科学家本人，不过与此同时，另一位科学家可能觉得这套理论荒谬透顶，或者根本就是错的。争论的正反双方都明白，能为大部分观测数据找到最完美解释的理论才拥有最强大的生命力（正如一位著名科学家说过的那样，要对那些能解释所有数据的理论保持警惕，因为到头来它往往会被证伪）。

人择原理之争短期内恐怕还无法平息，但在不远的未来，学界必然会继续提出其他更多假设，试图解释我们在宇宙中观察到的现象。比如，普林斯顿大学的保罗·斯泰恩哈特（Paul Steinhardt）与剑桥大学的尼尔·特（Neil Turok）共同提出了宇宙的“火劫模型”（ekpyrotic model）——他们真该好好学学怎么起名。这套模型的灵感来自粒子物理学中的弦论（string theory），斯泰恩哈特认为宇宙一共拥有十一个维度，其中大部分维度处于“折叠态”，这有点像卷起来的袜子，所以它们在宇宙中占据的空间近乎无穷小。某些额外的维度拥有实在的尺寸和大小，只是无法被我们感知，因为我们仍被困在熟悉的四个维度中。如果我们将宇宙中的所有空间想象成一张无限薄的平面（这个模型将空间的三个维度压缩成了两个），同时存在另一张与它平行的平面，那么这两张平面可能会互相靠近，然后发生碰撞，大爆炸就是碰撞的结果。接下来，两张平面弹开，每张平面的历史沿着我们熟悉的脉络展开，星系和恒星就此诞生。最终这两张平面会停止反向运动，重新开始靠近彼此，引起下一次碰撞和大爆炸。在这个模型中，宇宙的演化就是一段段以千亿年为单位的循环历史，每次循环至少在大体上保持一致。“ekpyrotic”这个词语在希腊语中的意思是“烈火”（或许你更熟悉的是另一个词：“纵火”，pyromaniac），“火劫宇宙”通过这种玄奥的方式告诉所有人，我们所知的宇宙诞生于一场大火之中。

无论是从感情上说还是从理性上说，宇宙的火劫模型都很有吸引力，但这仍不足以说服斯泰恩哈特的很多宇宙学家同侪，至少现在还不能。不过，就算火劫模型最终被证伪，有朝一日，也许某个和火劫模型一样含糊暧昧的理论会帮助宇宙学家达成夙愿，完美地解释神秘莫测的暗能量。如果有人能够抛开“世上有无限多个宇宙，我们恰好幸运地生活在其中一个宇宙里”这套说法，为现在的宇宙常数提供一个无懈可击的解释，那么就连最顽固的人择方法支持者也不会固执己见，抗拒这样的新理论。正如R.克朗布（R. Crumb）创造的一位卡通角色说过的那样：“我们生活的世界多么精彩，多么奇怪呀！哇！”

卷二

星系和宇宙结构的起源

第七章　发现星系

两个半世纪以前，那时候英国天文学家威廉·赫歇尔爵士（Sir William Herschel）还没有制造出全世界第一台真正的大型望远镜，人类所知的宇宙只有恒星、太阳、月亮、行星、木星和土星的几颗卫星、几个模糊的天体，以及在夜空中绘出一条牛奶路的那个星系。事实上，“星系”（galaxy）这个词来自希腊语“galaktos”，意思是“牛奶”。天空中还有一些模糊的天体，它们的学名叫作“星云”（nebula），这个词来自拉丁语里的“云”——这些形状模糊的天体包括金牛座的蟹状星云（Crab nebula）和仙女座的仙女座星云（Andromeda nebula）。

赫歇尔的望远镜直径约为1.22米，在它建成的1789年，这样的尺寸堪称石破天惊。支撑望远镜、帮助它调整方向的桁架结构复杂，因此这套设备看起来十分笨重，不过，当这台望远镜的镜头指向天空，赫歇尔清晰地看到了组成银河的无数颗恒星。利用这台望远镜和其他更轻巧的小望远镜，赫歇尔和妹妹卡罗琳（Caroline）共同编制了第一份详细的北半球“深空”星云目录。赫歇尔的儿子约翰爵士延续了家族传统，为父亲和姑妈编制的北半球天体目录增补了一些内容。他还在非洲最南端的好望角待了很长一段时间，为南半球可见的大约1700个模糊天体编制了目录。1864年，约翰爵士将已知的所有深空天体汇总到一起，编撰了一份《星云和星团总表》（*A General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars*），这份表单共有5000多个条目。

尽管当时的天文学家收集了这么多数据，但谁也不知道这些星云到底是什么，它们离地球有多远，各个星云之间又有何差别。无论如何，1864年版的总表给了天文学家一个机会，现在他们可以根据形态或者应该说形状对星云进行分类。根据“所见即所名”的棒球裁判传统（赫歇尔编撰总表的时候，这项运动正好进入了全盛时代），天文学家将旋涡状的星云命名为“旋涡星云”（spiral nebula），大体呈椭圆形的自然是“椭圆星云”（elliptical nebula），那些形状不规则——既不是旋涡也不是椭圆——的星云则被命名为“不规则星云”（irregular nebula）。有的星云看起来又小又圆，跟望远镜里的行星差不多，所以它们就成了“行星状星云”（planetary nebula）——多年来这个名字一直困扰着天文学的初学者。

在天文学历史上的大部分时间里，天文学家一直非常直白，他们描述事物的方式和植物学者差不多。天文学家在不断增补的星图中寻找相似的模式，然后利用这些模式对天体进行分类。这样的研究方式十分合理。大部分人从孩提时起就会自发地根据物品的外观和形状来排列它

们。但“所见即所名”的方法能做的也只有这么多了。由于夜空中这些模糊天体的大小看起来都差不多，赫歇尔家族一直以为，所有星云和地球之间的距离也都差不多。所以对他们来说，使用同样的方式来归类所有星云是一种公平无私的好办法。

问题在于，后来我们发现，“所有星云和地球的距离大体相当”的假设其实大错特错。大自然总是那么神秘莫测，甚至有些鬼鬼祟祟。某些被赫歇尔家族归类为星云的天体和地球的距离并不比恒星更远，它们其实比较小（如果万亿千米级的尺寸也算“比较小”的话）。其他一些星云的距离要远得多，既然所有星云的大小看起来都差不多，那么距离较远的星云实际尺寸必然远大于那些相对较近的“同类”。

我们可以从中学到一课：不要轻信事物的表象，你应该做的是深入追问它到底是什么。幸运的是，到了19世纪末，科技的发展赋予了天文学家新的工具，现在他们能做的就不仅仅是归类宇宙中的事物了。这样的改变促成了天体物理学的诞生，物理规则在天文学领域找到了用武之地。

就在赫歇尔推出星云总表的年代，研究星云的天文学家得到了一件新的科学设备：光谱仪（spectroscope）。光谱仪的唯一用途是将光分解成多种颜色组成的光谱。这些颜色和颜色蕴含的特征不仅能揭示光源化学成分的大量细节，根据多普勒效应，它还能告诉我们，这个光源到底是在接近还是在远离地球。

光谱仪揭示了一个惊人的事实：差不多所有旋涡星云（这种星云几乎主宰了银河以外的天空）都在以极高的速度远离地球。与此相对，所有行星状星云和大部分不规则星云的运动速度相对较慢——其中一部分离我们越来越近，另一部分渐行渐远。难道银河中心发生了一场大爆炸，但是只有旋涡星云飞了出去？如果真是这样，那为什么没有任何旋涡星云坠落下来？或者我们正好在一个特殊的时间点目睹了这场悲剧？尽管摄影术的进步带来了显影速度更快的感光剂，让天文学家得以测量那些越来越暗淡的星云光谱，但这并未阻止大批旋涡星云离去的步伐，这些问题依然没有答案。

天文学和其他科学领域的绝大部分进步是由新技术推动的。随着20世纪20年代的到来，另一台关键设备粉墨登场：加州帕萨迪纳附近的威尔逊山天文台竖起了直径2.54米的胡克望远镜。1923年，美国天文学家哈勃利用这台当时世界上最大的望远镜在仙女座星云中找到了一种特殊的恒星：造父变星（Cepheid variable star）。变星的亮度会依照已知的模式发生变化；造父变星的名字来自它的原型，仙王座（Cepheus）恒星造父一，这种星星亮度极高，哪怕距离遥远仍清晰可见。变星的亮度依照可识别的模式循环变化，所以只要坚持不懈、细心观察，天文学家必然会发现越来越多的变星。哈勃在银河里找到了几颗造父变星，他估

算了这些星星和地球之间的距离，但让他深感震惊的是，仙女座星云的那颗造父变星比他之前发现的这些暗得多。

对于这样的亮度差异，最合理的解释是，这颗新的造父变星和它所在的仙女座星云与地球之间的距离比银河里的造父变星远得多。哈勃意识到，如果事实果真如此，那么仙女座星云离地球一定非常非常远，它根本不可能位于仙女座，甚至不在银河里——所以它和其他旋涡星云姊妹也不可能被银河“泼洒”出去。

这个发现蕴含的意味简直令人窒息。哈勃的发现告诉我们，旋涡星云是独立、完整的恒星系统，它的尺寸和它包含的恒星数量应该跟我们的银河差不多。用哲学家伊曼努尔·康德（Immanuel Kant）的话来说，哈勃发现了我们的银河系以外必然存在几十个“宇宙岛”（island universe），要知道，仙女座星云不过是我们熟知的众多旋涡星云之中的一个。事实上，仙女座星云根本就不是星云，而是一个星系。

到了1936年，天文学家已经利用胡克望远镜和其他大型望远镜找到了大量宇宙岛，并为它们拍摄了照片，于是哈勃决定尝试一下形态学。他对星系类型的分析基于一个未经验证的假设：不同形状的星系实际上处于生命中不同的发展阶段。在1936年出版的著作《星云世界》（*Realm of the Nebulae*）中，哈勃将不同类型的星系排列成了一支音叉的形状，音叉的柄代表椭圆星系，形状最圆的那些星系位于叉柄最远端，相对较扁的星系放在两个分叉的交会处附近。普通的旋涡星系顺着其中一条分叉向外延伸：离叉柄最近的星系旋臂收得最紧，越往前走，旋涡星系的旋臂就越松散。另一条分叉由那些中心区域有一根“直棒”的旋涡星系组成，它们也按照从紧到松的顺序向外排列。

按照哈勃的预想，星系在诞生之初都是近圆的椭圆形，随着时间的流逝，它会变得越来越扁，最终呈现出旋涡结构，这个旋涡还会变得越来越松散。这真是个巧妙而美丽的想法，甚至说得上优雅，只是完全不对。首先，这幅“音叉图”排除了所有不规则星系；其次，天体物理学家后来发现，每个星系中最古老的恒星年龄都差不多，这意味着在宇宙的历史中，所有星系诞生于同一个年代。

接下来的30年里（第二次世界大战拖慢了研究的步伐），天文学家一直按照哈勃的思路观测、归类星系，这幅音叉图将所有星系分成了三类：椭圆星系、旋涡星系和棒旋星系，不规则星系被归类为一个独立的子集，因为这些星系的形状太奇怪，音叉图上根本没有它们的身影。椭圆星系看起来似乎大同小异，就像罗纳德·里根（Ronald Reagan）眼中的加州红杉一样。这些星系之所以如此相似，是因为它们既没有旋涡星系和棒旋星系特征明显的旋臂，也没有孕育新恒星的星际气体和尘埃形成的巨大云团。这些星系内部的造星运动早在几十亿年前就已结束，只剩下一簇簇球状或椭球状的星团。和最大的旋涡星系一样，最大的椭圆

星系包含了几千亿颗甚至更多的恒星，星系直径长达几十万光年。除了专业的天文学家以外，椭圆星系如梦似幻的图案和复杂的造星历史很难引发人们的赞叹，原因非常合理，至少和旋涡星系相比，椭圆星系的形状过于简单，造星过程也非常直白：它们尽己所能地将气体和尘埃转化成恒星，直至无以为继。

让人愉快的是，旋涡星系和棒旋星系带来了椭圆星系缺乏的视觉奇观，这些星系的形状和我们的银河系非常相似。如果我们能将相机送到银河系中心圆盘上方或下方几十万光年以外，它拍下的照片必将深深搅动我们的心灵和头脑，这张照片上的图像其实就和我们现在看到的旋涡星系差不多。今天，我们觉得这个目标依然十分遥远，因为人类发射的飞得最远的太空探测器才刚刚走过了这个距离的十亿分之一；就算我们能制造出以光速航行的探测器，人类也要等到很久以后（这个时间跨度远远超过有记载的人类历史）才能看到这张照片。而在目前，天文学家只能继续从银河系内部测绘我们的星系，透过树木般林立的恒星和星系描摹这片森林的轮廓。他们的努力让现在的我们知道了，银河系的形状和我们的近邻——仙女座那个巨大的旋涡星系——差不多。仙女座大约位于240万光年以外，这个距离不远不近，观测起来十分方便，这位邻居为我们提供了旋涡星系基本结构模式的大量信息，也让我们看到了各种各样的恒星和它们的演化历程。仙女座星系的所有恒星与我们之间的距离都差不多（大概只有几个百分点的出入），所以天文学家知道，我们观察到的这些恒星的明亮程度和它们自身的亮度直接相关，而恒星的亮度又和它们每秒释放的能量成正比。这条规则无法应用于银河系内的天体，但在观测其他星系的时候，这条规则大大降低了天文学家研究恒星演化、得出关键结论的难度。仙女座星系边缘有两个绕着主星系旋转的椭圆状卫星星系，它们各自包含的恒星数量只有主星系的百分之几，这两个星系同样为我们提供了关于恒星生命和椭圆星系结构的重要信息。晴朗的夜晚，远离城市灯光的观察者如果知道该往哪儿看，而且眼神足够锐利，那他或许能在天空中看到仙女座星系模糊的轮廓——这是人类裸眼可见的最遥远的天体，落入我们眼中的星光开启这段旅途的时候，人类的祖先还在非洲的峡谷里游荡，寻找根茎和浆果。

和银河系一样，在哈勃的音叉图上，仙女座星系也落在一条分叉的中间位置，因为它的旋臂既不算太紧，也不算太松。如果将星系比作动物园里的动物，那么我们可以把所有椭圆星系关进同一个笼子，但灿烂的旋涡星系却要占据好几间兽舍。如果将一张哈勃望远镜拍摄的这些美丽动物，尤其是（相对于那些更近的星系而言）距离我们1000万~2000万光年的那些星系的图片放到你眼前，那就无异于开启了一个充满无限可能性的奇观世界。它们的结构如此复杂，距离地球上的生活如此遥远，要是没有足够的心理准备，你会头晕目眩，或者你的大脑会启动防御机制，悄悄提醒它的主人，千万不要过度沉迷，这些东西既不能瘦大腿也没法治愈骨折。

作为星系家族的孤儿，不规则星系的数量大约占据了所有星系的10%，其余的份额由椭圆星系和旋涡星系瓜分，旋涡星系分到的那块要

大得多。与椭圆星系相反，不规则星系的气体和尘埃含量通常高于旋涡星系，这为造星运动提供了最活跃的温床。银河系拥有两个不规则的大型卫星星系，它们的名字特别令人困惑：这两个星系分别被命名为“大麦哲伦云”（Large Magellanic Cloud，LMC）和“小麦哲伦云”（Small Magellanic Cloud，SMC）。它们之所以叫这个名字，因为这两个星系的发现者是1520年麦哲伦环球航行船队中的水手，刚开始，他们还以为这些星星是天空中的云团。学界之所以将这份荣耀归功于麦哲伦的远航，是因为大小麦哲伦云的位置离南天极（地球南极正上方的点）太近，生活在北半球人口密集区（包括欧洲和美国大部分地区）的观测者永远不可能看到它出现在地平线上方。虽然大小麦哲伦云的规模远远不及包含了几千亿颗恒星的银河系和其他大型星系，但它们各自拥有几十亿颗恒星，内部也有大片的造星区域，其中最值得注意的是大麦哲伦云内的“蜘蛛星云”（Tarantula nebula）。近300年来最近、最明亮的超新星也出现在这个星系中，它被命名为“超新星1987A”。这场爆炸发生的时间必然是公元前16万年前后，因为它的光芒在1987年传到了地球。

20世纪60年代以前，天文学家一直满足于这套分类系统，几乎所有星系都被他们划分成了旋涡星系、棒旋星系、椭圆星系或者不规则星系。从他们的角度来说，这么做也没错，因为超过99%的星系都能纳入这套体系（既然“不规则星系”都堂而皇之地占据了一个分类，那么这个结果也没什么奇怪的）。可是就在这10年里，一位名叫霍尔顿·阿尔普（Halton Arp）的美国天文学家发出了不和谐的声音，哈勃音叉图和不规则星系共同构建的简单分类体系遭到了挑战。秉持着“将疲惫穷苦的大众都交给我”的精神，阿尔普用世界上最大的望远镜——加州圣迭戈附近帕洛马山天文台的海尔望远镜（Hale Telescope）——拍摄了338个形状非常奇特的星系。阿尔普于1966年出版的《特殊星系图集》（*Atlas of Peculiar Galaxies*）是一座真正的科研宝库，它让我们看到了宇宙中各种各样“搞砸了”的情况。虽然在所有的星系中，这些“特殊星系”——形状奇怪得连“不规则”都不足以形容的星系——所占的比例极低，但它们却揭示了一些重要的信息，我们从中看到了出错的星系可能变成什么样子。比如说，后来我们发现，阿尔普图集中的很多特殊星系实际上是两个曾经彼此独立的星系碰撞融合留下的残骸。这意味着“特殊星系”根本就不是新的星系种类，就像撞坏了的雷克萨斯不是新款汽车。

要追踪这样的碰撞是怎么发生的，光靠笔和纸肯定远远不够。因为两个星系中的每一颗恒星都有自己的引力，这些力会同时影响两个系统中的其他所有恒星。简单地说，你需要一台计算机。星系碰撞是一场绵延几亿年的盛大演出。利用计算机模拟两个星系的碰撞，你可以随心所欲地选择开始和暂停的时间，在1000万年、5000万年和1亿年的节点上分别拍摄快照。每个时间节点的场景都不太一样。翻开阿尔普的图集，你会发现这个“星系”处于碰撞早期，另一个处于晚期，这两个星系发生了侧面碰撞，那两个是迎头相撞。

虽然天文学家在20世纪60年代初就完成了最早的计算机模拟，而且早在20世纪40年代，瑞典天文学家埃里克·霍姆伯格（Erik Holmberg）就想出了一个好主意，他利用光模拟引力，在桌子上摆出了星系碰撞模型，不过直到1972年，双双任教于麻省理工学院的阿拉尔·图默（Alar Toomre）和朱利·图默（Juri Toomre）兄弟才首次描绘了两个旋涡星系“故意一股脑儿”撞到一起的辉煌画卷。根据图默模型，撕裂星系的罪魁祸首是潮汐力，也就是不同位置的引力差。两个星系彼此靠近的时候，星系边缘引力迅速增长，等到它们擦肩而过或者穿过彼此时，这股力量会拉长、扭曲整个星系，阿尔普那本《特殊星系图集》中的大部分特殊星系都是这样形成的。

除此以外，计算机模拟还能通过什么方式帮助我们理解星系呢？哈勃的音叉图将“普通”旋涡星系和中间有一根密集“短棒”的旋涡星系分成了两类。模拟程序表明，这根短棒可能只是一种暂时的现象，而不是区分不同星系种类的标志性特征。现在你看到的“短棒”可能再过1亿年就会消失。但我们无法在现实世界中观察那么长时间，只能利用计算机将1亿年的时间压缩到几分钟内，通过这种方式观察跨越漫长时间尺度的奇景。

阿尔普的特殊星系只是冰山一角，20世纪60年代，天文学家开始探索各种看起来不像星系的奇怪系统，直到几十年后，他们才摸到了一点门路。走进这个突然出现的星系动物园之前，我们必须重拾之前被打断的宇宙演化故事，审视所有星系，包括正常星系、近乎正常的星系、不规则星系、特殊星系和怪得令人震惊的奇异星系——的起源，弄清它们到底是怎样诞生的，而我们又是多么幸运：我们生活的世界位于一个巨型旋涡星系的远郊，距离星系中心约30000光年，往外再走20000光年就是模糊弥散的星系边缘，这样的位置相对比较清静，所以我们才能从容地观察这个宇宙。承蒙旋涡星系的基本规则关照，我们的太阳诞生于气体的云团中，它沿着一条近乎圆形的轨道围绕银河系中心旋转，公转周期大约是2.4亿年（这个时间跨度有时候也叫“宇宙年”，cosmic year）。时至今日，我们的太阳大概已经转了20圈，接下来的日子里，它大概还能再转上20圈左右。在这段时间里，我们不妨先看看星系来自何方。

第八章　结构的起源

回顾宇宙中物质演化的历史，沿着140亿年的长河向上回溯，我们很快就会发现一种亟待解释的趋势：无论在宇宙中的什么地方，物质总会孜孜不倦地自我组织，形成结构。大爆炸之后的宇宙几乎完全是均匀的，然后物质开始聚集生成大大小小的团块，制造出巨大的星系团和超星系团、星系团内部的独立星系、组成每个星系的几十亿颗恒星，很可能还包括许多恒星公转轨道上那些小得多的天体：行星及其卫星、小行星和彗星。

要理解如今组成可见宇宙的这些天体源自何方，我们必须弄清一个问题：是什么样的机制将宇宙中弥散的物质凝聚成了高度结构化的元件？要完整描述宇宙中的结构是如何出现的，我们必须将现实的两个方面融合到一起，不过对于这个问题，目前我们仍力有未逮。正如前几章中介绍的，我们必须将量子力学（它描述的是分子、原子及其成分粒子的行为）和广义相对论（它描述的是极大量的物质和空间如何相互影响）融会贯通。

第一个尝试用一套理论同时描述亚原子微观世界和天文尺度宏观世界的科学家是爱因斯坦。如今的科学家继承了前人的宏志，尽管他们的努力收效甚微，但在“大统一理论”（grand unification）完成之前，他们必将不屈不挠地奋斗下去。在那么多令人困扰的未知中，现代宇宙学家最烦恼的问题只有一个：他们无法建立一套理论，将量子力学和广义相对论融合到一起。与此同时，这两个看似风马牛不相及的物理学分支——它们分别描述极大和极小两个相距遥远的世界——似乎完全不在乎我们的无知，它们在同一个宇宙中和谐共存，各自做出了不少成就，仿佛是在嘲笑我们试图将它们融为一体的努力。一个拥有一千亿颗恒星的星系显然不会在意自己内部构成行星系统和气体云的原子和分子遵循怎样的物理规则。那些被我们命名为星系团和超星系团的更大的物质团块更不在乎这事儿，它们自己就是由几百甚至几千个星系组成的。但如果没有早期宇宙中微不可察的量子涨落，宇宙中这些最宏大的结构根本不可能存在。要理解这些结构是怎么诞生的，我们必须尽可能地克服自己的无知，在量子力学主宰的微观世界（结构起源的关键就藏在这里）和广义相对论统治的天文世界（量子力学在这么宏大的尺度上不起作用）之间架起一座桥梁。

为了达到这个目标，我们必须设法解释大爆炸之后那个近乎完全均匀的宇宙如何演化出了今天我们看到的各种结构。任何试图解释结构起源的理论必须契合宇宙现在的状态。即便是这个最简单的任务也难倒了

不少天文学家和宇宙学家，好在我们已经摆脱了那些错误的开头和谬误（至少我们热切地希望如此），走上了一条正确描述宇宙的光明大道。

在现代宇宙学历史上的大部分时间里，天体物理学家一直假设，宇宙中的物质均匀分布且各向同性。在一个物质均匀分布的宇宙中，每个方向看起来和其他方向没什么两样，就像一杯搅匀的牛奶。各向同性意味着宇宙从任何方向看起来都是一样的，无论观察者位于时空中的哪个位置。这两个描述看起来似乎是一回事，但事实并非如此。比如说，地球上的经线就不是均匀分布的，因为它们在某些地方的距离较近，某些地方距离较远；不过有两个地方的经线各向同性，那就是所有经线汇集的南北极点。无论你是站在这个世界的“顶端”还是“底部”，不管你怎么左右转头，你看到的经线格栅总是一样的。我们可以再举一个更贴近物理的例子，想象一下，你站在一座完美的圆锥形山峰峰顶，这座山峰是天地间的唯一物体，那么在这个点上，无论你望向哪边，眼前的地球总是一模一样。如果你正好生活在一块箭靶的正中央，或者你是一只蜘蛛，待在自己织成的完美的圆网中央，那么也会发生同样的事情。在上面这几个例子里，你看到的世界各向同性，但绝不均匀。

如果想找均匀但并非各向同性的例子，不妨看看砖墙。如果瓦工遵循传统的交叠砌墙方式，而且所有砖块都是完全相同的矩形，那么对于相邻的几块砖头和填充在砖头之间的灰浆来说，这堵墙就是均匀的。但要是你从不同的方向观察，灰浆线条的排列却不一样，所以它不是各向同性的。

有趣的是（对于那些趣味比较特别的人来说），数学分析的结果告诉我们，要让宇宙看起来均匀，那它必然处处各向同性。根据另一条数学形式的定理，只要空间中存在三个能观察到各向同性的点，那它必然处处各向同性。我真不明白为什么有人觉得数学是无聊乏味的空想！

从审美角度来说，宇宙学家很愿意相信空间中的物质均匀分布且各向同性，他们甚至将这个假设当成了宇宙学的基本原则，我们或许可以称之为“平庸原则”（principle of mediocrity）：宇宙中的某个地方有什么理由比另一个地方更有趣？但如果从较小的尺度来观察，我们很容易发现，这套理论很难站得住脚。我们生活于其上的这颗固体行星平均物质密度大约是5.5克/立方厘米，作为一颗典型的恒星，我们的太阳平均密度大约是1.4克/立方厘米，但太阳和地球之间的行星际空间平均密度却小得多——大约比这两个数小21个数量级。宇宙中占地最广袤的星系际空间，平均每10立方米内连一个原子都没有，它的物质密度比行星际空间还要小9个数量级。这足以让大多数人相信，物质的富集只是宇宙中的偶然现象。

随着天体物理学家的视野不断拓展，他们清晰地看到，像我们的银河系这样由无数恒星组成的星系飘浮在近乎真空的恒星际空间中。这些星系还会聚集形成星系团，这无疑打破了宇宙均匀且各向同性的假设。不过还有一线希望：如果把观察可见物质的尺度再放大一些，也许天体

物理学家最终会发现，这些星系团在宇宙中均匀分布且各向同性。要让某个特定的空间区域看起来均匀分布、各向同性，那它一定得够大，这样一来，任何结构（或者没有结构）看起来都不会显得突兀。如果用我们挖的西瓜球来类比的话，均匀分布且各向同性意味着这个空间中任何一处的任何性质都和平均性质十分相似，就像你挖出来的西瓜球只要大小差不多，看起来都一样。要是宇宙的左半边和右半边看起来不一样，那就很尴尬了。

要看到一个均匀分布且各向同性的宇宙，我们需要将观察的尺度放到多大？地球的直径是0.04光秒，海王星的公转轨道直径约8光时，银河系内的恒星组成了一个直径约10万光年的扁平圆盘，而银河系所在的室女座超星系团绵延6000万光年。这么说来，能让我们观察到均匀分布、各向同性的宇宙尺度必然大于室女座超星系团。天体物理学家在研究空间星系分布的时候发现，哪怕从1亿光年的尺度上看，星系就像相互交缠的薄片和细丝，它们之间仍有相对空旷的宽阔沟壑。这个尺度上的星系分布一点也不均匀，也谈不上什么各向同性，它更像一块松软的海绵。

不过，后来天体物理学家画出了更大的地图，在这张地图上，他们终于找到了梦寐以求的均匀和各向同性。他们发现，如果将“西瓜球”的尺寸放大到3亿光年，那么每个大小相似的宇宙西瓜球看起来的确差不多，他们苦苦追寻的宇宙美学标准终于得到了满足。不过，当然，在更小的尺度上，物质只会自顾自地聚集成团，根本不管什么均匀或者各向同性。

300年前，牛顿也思考过物质是如何形成结构的。以牛顿的聪明才智，他自然很容易接受宇宙均匀分布且各向同性的概念，不过紧接着他又想到了一个普通人很难意识到的问题：宇宙中的物质自发形成了各种结构，但它们为什么没有全部聚在一起，形成一个超大质量的团块呢？牛顿提出，我们并未观察到这样的“超大物质团”，所以宇宙必然是无限的。1692年，在一封写给剑桥大学三一学院院长理查德·宾利（Richard Bentley）的信里，牛顿提出：

如果宇宙中的所有物质均匀分布，每个粒子的固有引力无差别地作用于其他所有粒子，假如这个物质均匀分布的空间是有限的，那么在引力的作用下，有限空间以外的物质必然会受到其内部物质的吸引。出于这个原因，外部的所有物质最终必然坠入有限空间，与其内部的物质结合在一起，形成一个巨大的物质球。但是，如果物质均匀分布在一个无限的空间中，那它永远无法凝聚成一整个大团，而是这里聚成一小团，那里聚成一小团，由此产生无限多个大型物质团块；这些物质团块散落在无限的空间中，彼此相距遥远。

牛顿提出，这个无限的宇宙必然是静态的，它既不会膨胀，也不会收缩。在这个宇宙中，让天体“凝聚”成形的驱动力来自引力——任何有质量的物体作用于其他所有物体的吸力。引力是创造结构的核心因素，牛顿的这一论断直到今天仍真实有效，只是如今的宇宙学家面临的问题比牛顿时代的更棘手。我们无缘消受静态宇宙带来的种种好处，今天的我们必须承认这样的事实：尽管引力赋予了物质收拢聚集的趋势，然而自大爆炸以来，宇宙一直在持续膨胀。天体结构如何克服这样的膨胀聚集成形？考虑到大爆炸之后的一小段时间里，也就是天体结构开始形成的那个年代，宇宙膨胀的速度比现在快得多，这个问题就更难回答了。乍看之下，要让弥散的气体凝聚形成巨大的天体，我们似乎不能再依靠引力，就像你没法用铲子清除晒谷场上的跳蚤一样。但事实上，引力仍是促使天体结构成形的核心因素。

早期宇宙膨胀的速度极快，如果当时的宇宙在所有尺度上严格遵守均匀且各向同性的规则，那引力根本没有获胜的机会，今天的宇宙中也不会有星系、恒星、行星和人类，只有均匀散落的原子——这个无聊的宇宙既没有观察者，也没有可供观察的物体。但如今我们看到的宇宙充满乐趣、激动人心，它之所以会存在，唯一的原因是在大爆炸之后那短暂的关键时期内，宇宙并不是均匀分布、各向同性的，这道“前菜”为后来物质和能量的聚集埋下了伏笔。如果没有这样的开篇，引力根本无法抗拒宇宙的急速膨胀，物质也不会聚集形成今天我们熟悉的天体结构。

空间的不均匀和各向异性为宇宙中的所有结构播下了种子，为什么会出现这样的偏差呢？答案藏在量子力学的世界里，要是我们想追寻自己到底来自何方，那就必须踏入这个牛顿不曾想见的神秘领域。量子力学告诉我们，从最小的尺度上看，物质的分布不可能保持均匀和各向同性。恰恰相反，随着物质被拆分成一团团不断消失然后重生的颤抖的粒子，每一刻都有不同数量的粒子消失或重现，物质的分布也将出现随机的涨落。在任意给定的时刻，总会有某个空间区域内的粒子数量略高于其他区域，因此它的物质密度也略大一点。世间的所有事物都诞生于这个反直觉的狂想之中。密度略大的区域有机会吸引略多一点的粒子，随着时间的流逝，宇宙中密度相对较高的区域开始形成结构。

回顾大爆炸之后、结构形成之初的早期宇宙，我们需要重点关注两个时期，其中一个是“暴胀时期”，也就是宇宙急速膨胀的阶段，另一个是“退耦时期”（time of decoupling），这个阶段大约发生在大爆炸之后38万年，从此以后，宇宙背景辐射不再与物质发生互动。

暴胀时期持续的时间是大爆炸之后10^{-37}秒到10^{-33}秒。在这段相对比较短暂的时间里，时空构造膨胀的速度比光还快，短短的10^{-33}秒内，宇宙的尺寸就从质子的$1/10^{20}$膨胀到了10厘米左右。是的，可观测的宇宙曾经只有一个西柚那么大。那宇宙为什么会膨胀？宇宙学家认为核心原因在于“相变”（phase transition），它在宇宙背景辐射中留下了可观测的特殊痕迹。

相变不仅仅存在于宇宙学领域，同样的变化常常发生在你的家里。我们会把水冻成冰块，烧开水的时候也会产生蒸汽。如果在糖水里放一根线，糖霜就会沿着这根线凝结。潮湿黏稠的面糊可以烤成蛋糕。这类变化有相似的规律可循。无论如何，相变前后的物质看起来总是很不一样。根据宇宙的膨胀模型，大爆炸之后的一小段时间里，充斥宇宙的能量场经历了某种相变。类似的相变一共发生过好几次，我们现在讨论的这一次相变不仅促成了早期宇宙的急速膨胀，还赋予了宇宙高低密度区域交错分布的特殊涨落模式。接下来，这样的涨落凝固成了膨胀的空间构造，为星系的形成提供了一幅蓝图。威廉·吉尔伯特（William Gilbert）和阿瑟·萨利文（Arthur Sullivan）创作的歌剧《天皇》中有位名叫浦巴的人物，他曾骄傲地宣称，他的血统可以追溯到“最古老的原子球”；与此类似，我们也可以说，我们和宇宙中的所有结构都起源于暴胀时期亚原子核尺度的涨落。

我们能找到什么证据来支持这个大胆的假设？天体物理学家不可能真正看到宇宙诞生之初那0.000000000000000000000000000000000001秒内到底发生了什么事情，所以他们只好退而求其次，利用科学的逻辑将这个早期阶段与我们能观察到的年代联系起来。如果暴胀理论正确无误，而量子力学告诉我们，均匀且各向同性的流体内部必然存在细微的差别，所以暴胀时期的宇宙必然存在最初的涨落，因此空间中有可能出现物质和能量相对比较密集或稀疏的区域。宇宙背景辐射就像舞台的前景，它是我们这个时代与早期宇宙之间的屏障与纽带。如果婴儿期的宇宙真的存在这样的起伏和波动，那么我们应该能在宇宙背景辐射中找到相应的痕迹。

正如我们已经看到的，宇宙背景辐射由大爆炸之后最初的那几分钟产生的光子组成。在宇宙历史的早期阶段，这些光子与物质相互作用，以极高的能量将任何有机会形成的原子撞得粉碎，所以任何原子都无法存留太长时间。但宇宙的持续膨胀剥夺了这些光子的能量，所以到了退耦时期，光子的能量已经不足以阻止电子绕着质子和氦原子核旋转。从大爆炸之后38万年的这个阶段开始，原子存留下来（除非遭到附近恒星辐射之类的破坏），能量越来越弱的光子继续在宇宙中游荡，由此形成了宇宙背景辐射，即CBR。

因此，CBR携带着历史的印记，那是退耦时期的宇宙留下的快照。天体物理学家已经学会了审视这帧快照的方法，而且他们的观测精确度还在不断提高。首先，CBR的存在表明，我们对宇宙历史的基本理解是正确的。其次，几十年来，天体物理学家测量宇宙背景辐射的能力越来越强，气球和卫星搭载的精密设备帮助他们绘出了一幅CBR地图，从中我们可以看到各向异性带来的微小偏差。这幅地图提供了一份历史记录，曾经尺度极小的涨落在暴胀时期之后的几十万年里随着宇宙的膨胀变得越来越大，接下来的几十亿年里，它又慢慢发展成了宇宙中大尺度的物质分布。

这是一个了不起的成就：CBR让我们得以测绘早已消失的早期宇宙

留下的印记，也让我们在天空中找到了那些密度略高于平均值的区域，后来那些区域发展成了星系团和超星系团。密度略高于平均值的区域留下的光子也比低密度区域多一些。能量的损失导致光子无法继续干扰新形成的原子，宇宙也随之变得透明，每个光子从此踏上了远离出生地的旅途。从我们现在所在的区域附近出发的光子奔向四面八方，时至今日，它们已经走过了140亿光年的距离，宇宙的彼端，另一个遥远的文明或许正在测量这些CBR，而“他们的”光子又成了我们观察到的CBR的一部分，它们诉说着很久很久以前、很远很远的地方发生的故事，那时候，宇宙中的结构刚刚开始形成。

1965年，天体物理学家首次探测到了宇宙背景辐射，接下来的几十年里，他们一直在寻找CBR中的波动和起伏。从验证理论的角度来说，他们迫切地希望找到这样的起伏，因为要是CBR在十万分之一的尺度上不存在起伏，那他们构建的结构起源模型就彻底失去了依据。如果在CBR中找不到这些种子，我们就无法解释自己为什么存在。不过令人欣慰的是，空间的各向异性正如人们期望的那样显露了真容。将仪器的测量精确度提高到预想的等级以后，宇宙学家几乎立即就找到了期盼已久的证据；首先完成这一壮举的是1992年的COBE卫星，接下来，我们在第三章中介绍过的气球和WMAP卫星搭载的精确度更高的仪器进一步验证了这一结果。组成CBR的微波光子数量在不同的位置有细微的差异，WMAP以极高的精确度将它描绘下来，这就是大爆炸后38万年的宇宙涨落留下的证据。这样的涨落与CBR的平均温度通常只有微小的差异，所以寻找它们就像是在方圆1.6千米的池塘中寻找一滴密度略低于平均值的油花。这样的各向异性非常微弱，但它却是一切的开始。

在WMAP绘制的宇宙背景辐射地图上，那些较大的热点意味着这些区域的引力将克服膨胀宇宙的弥散趋势，聚拢足够的物质，最终形成超星系团。时至今日，这些区域已经发展成了包含1000个星系的庞大结构，其中每个星系各自拥有1000万亿颗恒星。如果算上暗物质，这样的星系团质量差不多相当于10^{16}个太阳。与此相反，较大的冷点意味着这些区域无法抵抗宇宙的膨胀，它们最终会发展成近乎真空的巨大结构，天体物理学家称之为“空洞”（void），它的范围由周围非空洞的区域界定。所以，天空中那些薄片或细丝状的星系不光会彼此交缠，形成星系团，还会形成“墙壁”和其他几何图形，在宇宙中圈出一块块空白的区域。

当然，成熟的星系并不是从密度略高于平均值的物质中突然冒出来的。从大爆炸后38万年到2亿年，物质不断聚集，但最早的恒星仍未诞生，宇宙中没有任何东西能发光。在这个黑暗的年代，整个宇宙里只有最初的那几分钟创造出来的东西——氢和氦，以及痕量的锂。除此以外，没有任何更重的元素，碳、氮、氧、钠、钙和其他更重的原子都不存在，能够吸收光的常见原子和分子还没有诞生。今天的宇宙中已经有了这些原子和分子，新形成的恒星发出的光会对它们产生压力，推开海量的气体，不然的话，这些气体就会坠向恒星。这样的“驱逐”效果将新生恒星的最大质量限制在了太阳质量的100倍以内。但在第一批恒星刚

刚诞生的那个年代，由于宇宙中没有能够吸收光的原子和分子，坠向恒星的气体基本就是氢和氦，这两种元素几乎无法阻挡恒星对外释放的光，所以更重的恒星才得以形成，它们的质量可达太阳质量的几百倍，甚至几千倍。

大质量恒星的生命就像在快车道上奔跑，质量最大的恒星生命节律也最快。它们以惊人的速度将自身的物质转化为能量，制造出海量重元素，最后迅速在爆炸中死亡。这些恒星的预期寿命只有几百万年，还不到太阳寿命的千分之一。今天的我们并不指望能在宇宙中找到这些来自宇宙早期的超大质量恒星，因为它们早已燃烧殆尽。时至今日，更重的元素遍布宇宙，这种超大质量恒星根本没有机会聚集成形。事实上，我们从未观察到任何一颗这样的巨型恒星。但我们认为，正是这些恒星为宇宙创造出了第一批如今的我们熟悉的元素，其中包括碳、氧、氮、硅和铁。你可以说这是施肥，也可以说它是污染，但这些生命的种子的确始于早已消失的第一代大质量恒星。

退耦阶段之后最初的几十亿年里，几乎所有尺度的物质都在引力的作用下聚集成团，引力造成的坍缩也成了家常便饭。超大质量黑洞的形成就是引力自然作用造成的结果之一，每个超大质量黑洞的质量都有太阳的几百万倍，甚至几十亿倍。这样的黑洞尺寸差不多相当于海王星的公转轨道，它会严重破坏周围的环境。坠向黑洞的气体云有加速的趋势，但它们的速度却提不起来，因为前面挡道的东西太多了。所以这些气体只好冲撞、摩擦路径上的所有物质，最终形成一个奔向黑洞的巨型旋涡。在它们永远消失之前，气体云超热物质内部的碰撞会向外辐射海量能量，亮度相当于太阳的几十亿倍，但这一切都发生在相当于太阳系大小的空间范围内。海量的物质和辐射向外喷射，在气体云旋涡的上方和下方形成绵延几十万光年的喷射流，能量在这条隧道内左冲右突，朝着四面八方逃窜。等到这团气体坠入黑洞，另一个旋涡早已形成，这个系统的亮度有起有落，忽明忽暗，每一次变化间隔几个小时，也可能是几天或者几周。如果旋涡的喷射流正好对准了你的方向，和侧面的观察者相比，你会觉得它看起来更亮，而且更加变化多端。从安全的远处眺望，黑洞和坠落物质共同组成的奇观比我们今天看到的星系小得多，却亮得多。这就是“类星体”（quasar），我们刚才描述的正是它的诞生过程。

20世纪60年代初，人类第一次发现了类星体。当时天文学家刚刚开始给望远镜配备对不可见波段辐射（例如，无线电波和X射线）特别敏感的传感器。有了新的设备，来自不可见波段的电磁辐射也被纳入了天文学家为星系绘制的肖像。与此同时，摄影技术的发展再次促进了显影剂的改进，两相结合之下，一批新的天体结构开始从宇宙深处显露真容。照片上最亮的那些天体看起来似乎只是简单的恒星，但它们会释放大量无线电波，这一点和恒星很不一样。确切地说，这些天体或许应该叫作“类恒星无线电波源”（quasistellar radio source）——这个称呼很

快被简化成了“类星体”。比无线电波更令人瞩目的是这些天体的距离：整体而言，类星体是宇宙中已知的距离我们最远的天体。类星体这么小，离地球又这么远，但我们依然能看到它发出的光，这意味着它必然是一种全新的天体。它们到底有多小？不会比太阳系更大。那又有多亮呢？就连那些最暗的类星体也比普通的星系更亮。

截至20世纪70年代初，天体物理学家一直认为，超大质量黑洞是类星体的动力之源，被黑洞引力吞噬的物质会发出璀璨的光芒。黑洞模型可以解释类星体的小尺寸和亮度，却不会透露黑洞的“食物”来源。直到20世纪80年代初，天体物理学家才开始研究类星体所在的环境，因为这种天体的中心区域实在太亮，我们很难观测它周围相对暗得多的其他东西。不过，随着新技术的发展，我们设法屏蔽了类星体中心区域的强光，天体物理学家终于有机会研究某些比较暗的类星体周围的东西了。随着探测方式和技术的进一步改进，每颗类星体周围的环境逐渐显现，我们甚至从中看到了旋涡结构。最后我们发现，类星体其实不是什么新天体，而是一种新的星系核（galactic nucleus）。

1990年4月，有史以来最昂贵的天文设备——哈勃太空望远镜——由美国国家航空航天局（NASA）发射升空。这台望远镜的尺寸和灰狗公司的大巴差不多，它能摆脱大气层的干扰，根据地面发射的指令在轨道上观测太空。宇航员给哈勃太空望远镜安装了修正主镜片制造缺陷的辅助镜片以后，它开始帮助我们探测普通星系内部从未有人触及的区域，包括星系中心。于是我们发现，星系中心的恒星运动速度快得不可思议，单靠附近其他恒星的引力（根据恒星发出的可见光，我们可以推算它的引力）根本无法解释。强引力、小区域……那一定是个黑洞。我们在几十个星系的核心区域相继发现了速度快得令人生疑的恒星。事实上，哈勃太空望远镜能够清晰拍摄到的所有星系中心都存在这样的现象。

现在看来，每个巨型星系中央很可能都有一个超大质量黑洞，这个黑洞也许是吸引其他物质聚集成团的引力之种，又或者在稍晚的阶段，它促成了星系外围区域的物质向中央汇集。但并非所有星系都是年轻的类星体。

中央存在黑洞的普通星系名单不断增长，研究者开始产生了新的疑问：是否存在非类星体的超大质量黑洞？或者周围没有星系的类星体？他们不由得勾画出了一幅新的图景，在这幅图景中，某些星系是从类星体开始的。类星体实际上只是普通星系可见的璀璨核心，要成为类星体，这个系统需要的不仅是饥饿的巨型黑洞，还有向内坠落的充足气体。等到这个超大质量黑洞吞噬了势力范围内的所有食物，只剩下那些够不着的恒星和气体在安全距离以外绕着它旋转，到了这个阶段，类星

体就会熄灭。然后你会看到一个温驯的星系，它中央的黑洞暂时陷入了沉睡。

天文学家已经发现了其他新的结构类型，它们的性质介于类星体和普通星系之间，具体取决于超大质量黑洞的“恶劣行为”。有时候，坠入星系中央黑洞的物质洪流速度稳定缓慢，只是偶尔有点波动。这样的星系核依然活跃，但相对比较温和。这些年来，我们发现的温和星系类型越来越多：LINER（Low-Ionization Nuclear Emission-line Region，低电离星系核）星系、赛弗特星系（Seyfert galaxy）、N型星系（N galaxy），还有耀变体（blazar）。这些天体结构被统称为“AGN”（“活跃星系核”的英文缩写）。类星体都出现在遥远的宇宙深处，但AGN和我们的距离有远有近。这意味着AGN反映了星系的各种“不端行为”。年代久远的类星体会吞噬周围的所有食物，所以我们只能在宇宙深处看到古老的类星体留下的残影。与此相对，AGN的胃口要小得多，所以哪怕已经过去了几十亿年，部分类星体周围还有食物可供它们消耗。

单靠AGN的可见形态来分类显然不够完善，所以天体物理学家在归类AGN的时候依据的是全波段的电磁辐射。从20世纪90年代中期到末期，研究者证明了星系的黑洞模型，他们还发现，要归类AGN动物园的大部分成员，其实只需要测量几个参数：天体结构中央的黑洞质量，黑洞“进食”的速度，以及我们相对于该结构吸积盘（accretion disk）和喷射流的观测角度。举个例子，如果我们观察的方向恰好“正对枪口”，也就是说，完全正对超大质量黑洞附近的喷射流，那么我们看到的天体结构要比侧面其他角度的观察者亮得多。这三个参数的差别可以解释天体物理学家观察到的几乎所有星系核形态，于是他们欣喜地发现，星系核的类型其实没有我们想象的那么多。借助这个机会，他们也进一步理解了星系的形成和演化。星系核的千差万别——形状、尺寸、亮度和颜色——最后都能归结到寥寥几个参数头上，这是20世纪末天体物理学最不为人知的伟大成就。它花费了无数研究者多年的精力和大量望远镜时间，虽然晚间新闻不会报道这种事情，但它的确是个了不起的成就。

但是，我们不能就此认为超大质量黑洞能够解释一切。虽然单个黑洞的质量可能是太阳的几百万倍甚至几十亿倍，但与其宿主星系相比，它的质量又显得微不足道。一般而言，大型星系中央黑洞的质量远远不到星系总质量的1%。如果我们想解释暗物质，或者宇宙中其他看不见的引力源，这些黑洞的影响小得几乎可以忽略不计。但要是仔细算算这些黑洞产生的能量（将黑洞释放的能量视作其构造的一部分），我们就会发现，星系形成的能量主要来自黑洞。与黑洞的能量相比，星系中所有绕轨运行的恒星和气体云拥有的能量都显得微不足道。要是没有埋藏在星系中央的超大质量黑洞，我们今天看到的星系可能根本不会有机会形成。每个星系中央给曾经闪亮但如今已经看不见的黑洞提供了一条隐藏的线索，它或许可以解释，物质如何聚集形成一个亿万恒星围绕普通核心公转的复杂系统。

要为星系形成建立一个更普适的模型，我们需要的不光是超大质量黑洞的引力，还得用引力来解释其他更传统的天文结构。星系中数以十亿计的恒星从何而来？幕后的操纵者依然是引力，在引力的作用下，一团气体云就能孕育几十万颗恒星。星系中的大部分恒星诞生于相对松散的“星协”（association）之中。相对密集的新生恒星则会形成可辨认的“星团”（star cluster），星团内部的所有恒星围绕星团核心公转，每颗恒星在宇宙中运转的舞步由同一星团内其他所有恒星的引力共同决定，这些星团本身又会在远离中央黑洞毁灭力量的安全轨道上围绕星系中心运行。

星团内部的恒星运行速度各异，有的恒星运动速度极快，甚至可能脱离这个系统。有时候真的会发生这样的事情：运动速度过快的恒星挣脱了星团引力的束缚，在星系中自由穿行。这些自由游荡的恒星，加上包含了数十万颗恒星的“球状星团”（globular star cluster），它们和其他一些恒星共同组成了星系外围的球状光晕。星系晕（galaxy halo）是宇宙中最古老的可见天体，它的主要成员是曾经耀眼但已经变得暗淡的短命恒星，这些恒星的年龄和星系本身相当。

最后坍缩（因此也最后形成恒星）的是聚集在星系盘（galactic plane）上的气体和尘埃。椭圆星系没有星系盘，它的所有气体已经全部形成了恒星。但旋涡星系内的物质呈扁平状分布，每个旋涡星系都拥有一个中央星系盘，最年轻、最明亮的恒星就诞生在这里，围绕星系核心运行的疏密不一的气体孕育了它们。就像热棉花糖只要相互触碰就会粘在一起，旋涡星系中所有未曾参与星团形成的气体都会坠向星系盘，这些气体粘在星系盘上形成一个物质盘，这个物质盘会慢慢孕育出恒星。从过去的亿万年直至未来的亿万年，旋涡星系不断孕育出一代又一代的恒星，每一代恒星的重元素含量都高于上一代。随着恒星慢慢衰老，这些重元素（天体物理学家所说的“重元素”指的是所有比氦更重的元素）又会融入向外逃逸的气流，或者成为大质量恒星爆炸（超新星）的残骸，最终散落到恒星际空间中。重元素的存在改变了星系，以及整个宇宙的化学环境，为我们所知的生命提供了舒适的温床。

我们刚才概括介绍了旋涡星系形成的典型过程，这样的演化大戏在宇宙中上演了数百亿次，由此产生了形态各异的天体结构：有聚集在一起的星系团，也有细丝状或者薄片状的星系。

对我们来说，眺望宇宙深处就等于眺望宇宙的往昔，所以我们不仅能观察星系现在的模样，还能窥探它们亿万年前的样子——只要把目光放远一点就好。但在实际的观测中，要妥善运用这项理论，我们还得克服一个障碍：几十亿光年外的星系看起来又小又暗，就连最优秀的望远镜也很难描摹它们的轮廓。不过无论如何，这些年来，天体物理学家依然在这方面取得了极大的进展。其中一个突破来自1995年，时任约翰·霍普金斯大学空间望远镜研究所（Space Telescope Science Institute）所

长的罗伯特·威廉姆斯（Robert Williams）将哈勃望远镜对准北斗七星附近的一个方向，观测了整整10天。我们之所以将这个突破完全归功于威廉姆斯，是因为负责筛选观测申请的哈勃望远镜时间分配委员会认为，威廉姆斯选择的这个区域空旷无趣，完全没有观察的价值。哈勃望远镜的日程排得很紧，既然没有任何项目能够直接从中受益，那就不值得为这个区域安排那么长的时间。但幸运的是，作为空间望远镜研究所的所长，威廉姆斯有权安排哈勃望远镜的一小部分观测时间（“所长的自由支配时间”），借着这个小小的特权，他最终拍下了“哈勃深空场”（Hubble Deep Field），它成了有史以来最著名的天文照片之一。

这10天的观测正好发生在1995年美国政府关门期间，截至目前，“哈勃深空场”是天文学历史上人们研究得最深入、最完备的一张照片。这张照片仿佛是从时间长河里撷取的一个纵截面，深空场中与银河系距离不一的星系和类星系天体发出的光分别来自不同的宇宙年代。比如说，我们可以从这张照片中同时看到13亿年前、36亿年前、57亿年前和82亿年前的天体，每个天体各自所属的年代取决于它和我们之间的距离。这张照片提供的数据宝库造福了数以百计的天文学家，借助“哈勃深空场”提供的新信息，他们得以深入理解星系如何随时间演化，刚刚形成的星系是什么样子。1998年，哈勃望远镜再次花费10天时间，拍摄了与第一次观测方向完全相反的南半球另一片天空，这张照片被命名为“哈勃南天深空场”（Hubble Deep Field South）。把两张照片放在一起进行比较，天文学家确认了第一张照片没有什么异常的地方（比如说，如果两张照片完全一样，或者完全不一样，那有人可能就会觉得是魔鬼在作祟），也进一步完善了不同星系如何形成的理论。经过一次成功的维修以后，哈勃望远镜装上了更好（更灵敏）的探测器，2004年，空间望远镜研究所又迫不及待地拍摄了第三张照片：“哈勃超深空场”（Hubble Ultra Deep Field），这是当时人们拍摄的最遥远的宇宙影像。

遗憾的是，就连哈勃望远镜也拍不到星系形成最早期的影像，这不光是因为那些天体距离遥远，更重要的是，在宇宙膨胀的作用下，来自那些天体的辐射已经转移到了电磁波谱的红外区域，超出了哈勃望远镜的探测范围。想要观测那些最遥远的星系，天文学家只能等待哈勃的继任者——詹姆斯·韦伯空间望远镜（James Webb Space Telescope，JWST）——设计制造完毕，发射升空并成功运转（这台望远镜的得名于阿波罗年代的NASA局长，这样的做法其实相当鸡贼，他们为望远镜选择了一位官员而非著名科学家的名字，确保望远镜计划不会被取消——现在，取消计划就相当于抹杀了一位重要官员的遗泽）。

JWST的镜头比哈勃的还大，它将在太空中展开形成一个巨大的反射面，仿佛一朵错综复杂的机械花朵。如果不把反射面折叠起来的话，我们的火箭根本装不下它。新的空间望远镜将配备一套比哈勃先进得多的设备，要知道，哈勃望远镜设计于20世纪60年代，建造于20世纪70年代，最后于1990年发射升空，在20世纪90年代，这台望远镜经历了一次重要的升级，但它仍然缺乏一些非常基本的功能，譬如探测红外辐射。2003年发射的斯皮策红外望远镜（Spitzer InfraRed Telescope

Facility，SIRTF）可以弥补哈勃望远镜的部分不足，SIRTF围绕太阳公转，它和地球之间的距离比哈勃望远镜远得多，这是为了避开我们的行星产生的大量红外干扰。出于同样的原因，JWST多半也会选择远离地球的运转轨道，因此我们不可能像现在维修哈勃一样为它提供维护服务——NASA最好一次搞定所有事情。如果新的望远镜能在2011年按计划升空，它将为我们拍下更壮丽的宇宙照片，包括100亿光年外的星系影像，它们比“哈勃深空场”中的那些星系更接近起源时期。[1]新的空间望远镜必将带来大量新数据，配合老式地面设备提供的信息，天文学家又有不少东西可以研究了。

未来充满无限可能，但天体物理学家过去30年来的成就也不容忽视，观测宇宙的新设备帮助他们完成了这些了不起的发现。卡尔·萨根（Carl Sagan）总喜欢说，要是连宇宙的伟业都无法让你驻足惊叹，那你肯定是个木头人。得益于观测技术的进步，现在的我们比萨根更了解星系起源的瑰丽历程：小于质子尺度的物质和能量分布的量子涨落最终孕育出了绵延3000万光年的超星系团。从混沌到宇宙，这样的因果关系影响着无比广阔的时空。正如微观的DNA链条决定了宏观物种的身份和特性，宇宙如今的模样和特性也来自最早期的构造涟漪，它穿越时间和空间，一直存留到了今天。无论是抬头、低头，还是反躬内省，我们都能感受到它的存在。

卷三

恒星的起源

第九章　尘归尘

远离城市灯光，仰望澄净夜空，你立即就会发现一条横跨天际的朦胧光带，上面还点缀着一块块漆黑的斑点。天空中这条乳白色的光带名叫“银河”，它的光来自宇宙中的亿万恒星和气态星云。透过双筒望远镜或者后院里的天文望远镜仔细观察，你会发现银河中那些黑暗无趣的区域的确漆黑一片，没什么可看的，但若是将镜头转向那些明亮的区域，你会发现乳白色的光晕化作了数不清的恒星和星云。

1610年，伽利略·伽利莱（Galileo Galilei）在威尼斯出版了一本题为《星际信使》（*Sidereus Nuncius*）的小书，在这本书中，他第一次描绘了自己透过望远镜看到的天空，包括银河内的一片片光斑。伽利略将自己观察天空的设备称为“窥天镜”，因为当时“望远镜”（telescope，希腊语中这个词的意思是“远眺者”）这个词还不存在；他情不自禁地写道：

在窥天镜的帮助下，我们可以清晰地观察银河；亲眼看到的事实足以粉碎哲学家持续数代的争执，我们也将从此摆脱言辞上的交锋。银河不过是成团分布的无数恒星。无论将窥天镜指向哪个方向，你都会立即看到数不清的恒星，其中很多星星看起来又大又亮，但那些小星星才真的深不可测。

伽利略笔下的“无数恒星”描绘的显然是银河系中恒星最密集的区域，天文学家重点关注的也是这些区域。谁会对那些根本没有可见恒星的暗区感兴趣呢？银河内的暗区很可能是宇宙中的洞，通往后方无垠的空旷空间。

直到300年后，人们才发现，银河中的黑斑其实根本就不是什么洞，而是密集的气体和尘埃组成的云团，它们遮住了远方的星星，但孕育恒星的温床就藏在这些云团深处。美国天文学家乔治·卡里·康斯托克（George Cary Comstock）提出过一个问题：远方的恒星为什么看起来那么暗？单靠距离完全无法解释它们损失的光芒。顺着康斯托克的思路，1909年，荷兰天文学家雅各布斯·科内利乌斯·卡普坦（Jacobus Cornelius Kapteyn）揪出了背后的元凶。在两篇题目均为《论太空光线吸收》（*On the Absorption of Light in Space*）的论文中，卡普坦列出证据，提出了自己的设想：那些黑暗的云团（“恒星际介质”）不仅会遮蔽

恒星的光芒，还会选择性吸收恒星光谱中不同波长的光线。在可见光的频率范围内，它们吸收、散射（从而削弱）的紫色光比红色光多得多。这样的选择性吸收最终会导致紫光的损失远大于红光，所以远方的恒星看起来比近处的更红。光在传播过程中穿过的星际介质越多，紫光的损失越大，星光变红的现象也越明显。

普通的氢气和氦气（它们是宇宙云团的主要成分）不会导致星光变红。但其他很多原子组成的分子却会产生这种效果——尤其是那些包含碳和硅的分子。有的恒星际微粒个头太大，不太适合再用分子来称呼，所以我们只好叫它“尘埃”；每个星际尘埃微粒都由数十万甚至数百万个原子组成。大多数人印象中的“尘埃”是家庭环境中的灰尘，但很少有人知道，封闭房屋里的灰尘主要是死亡脱落的人类皮肤细胞，如果你家养了不止一只哺乳动物的话，那就还有宠物皮屑。据我们所知，宇宙尘埃里完全没有人类上皮细胞，不过，恒星际尘埃的确包含大量复杂分子，它们发射的光子主要集中在红外和微波频段。直到20世纪60年代，天体物理学家才算有了称手的微波望远镜，而精密的红外望远镜直到20世纪70年代才出现。有了新的观测设备，他们开始深入探查恒星际物质确切的化学成分。接下来的几十年里，在这些新技术的帮助下，天体物理学家逐渐揭开了恒星诞生的复杂迷人图景。

气体云团并不是时时刻刻都在制造恒星，更常见的是，云团完全不知道自己下一步该何去何从。其实天体物理学家也不知道。我们知道的是，星际云团总是“倾向于”在自身引力作用下坍塌，制造出一颗或者多颗恒星，但云团的旋转及其内部动荡的气体运动却会破坏这一趋势。你在高中化学课上学过的气体压强会阻碍云团的坍塌。除此以外，磁场也会穿透云团，阻碍其内部带电自由粒子的运动，抵消引力带来的坍塌趋势。这个思想实验最可怕的地方在于，如果我们不是提前知道了恒星必然存在，那么来自第一线的观测结果将提供非常充分的理由，证明恒星根本不可能诞生。

银河系之所以叫银河系，是因为这个星系中恒星最密集的区域横跨天际，仿佛一条微微发光的带子；银河系内的几千亿颗恒星和巨型气体云一起围绕着银河中心旋转。恒星看起来只是一个个直径仅有几光秒的微小斑点，它们漂浮在近乎真空的宇宙之海上，偶尔彼此擦肩而过，就像夜晚的航船。从另一方面来说，气体云的尺度比恒星大得多，它们通常绵延几百光年，每一团气体云包含的质量都相当于100万个太阳。这些巨型云团在天穹中踽踽前行时常常发生摩擦，双方包含的气体和尘埃也会因此产生互动。有时候两朵云团会聚成一团，有时候它们又会互相冲撞，撕碎对方。互动的结果取决于双方的相对速度和碰撞角度。

如果云团的温度足够低（大约低于100K），那么哪怕发生了碰撞，它内部的原子也会紧紧粘在一起，而不是像温度较高时那样四下飞散。这样的化学变化会产生深远的影响。发光的微粒（现在每个微粒中包含着几十个原子），开始来回散射可见光，所以云团后方的星光衰减得厉害。等到这些微粒终于发育成熟，每个尘埃微粒将包含几十亿个原子。

处于“红巨星”阶段的衰老恒星也会制造出类似的尘埃微粒，并将它们轻轻吹向恒星际空间。由几十亿个原子组成的尘埃微粒不再像“年轻时”那样散射云团背后的可见星光。恰恰相反，它们开始吸收光子，然后将这些能量以红外辐射的形式重新释放出来，这种射线能够轻而易举地穿透云团。在这个过程中，光子的压力传递给了吸收它的分子，从而对云团产生了一个与光源方向相反的作用力。现在，云团与星光融为了一体。

引力让云团的密度不断增大，直到最后发生坍塌，恒星就此诞生。在这个过程中，云团内部的每个区域都将不遗余力地拉拢其他区域。比起冰冷的气体来，灼热气体抵抗压缩和坍塌的能力更强，所以我们现在面临的情况有些古怪：我们必须先让云团冷却下来，然后它才能产生足够的热量，制造出恒星。换句话说，要制造出核心温度高达1000万摄氏度（这是启动核聚变反应的必要条件）的恒星，云团必须尽可能地冷却下来。只有在几十K的极端低温环境中，云团才有可能坍塌，从而孕育出一颗恒星。

气体云坍塌变成新恒星，这个过程到底是怎么发生的？天体物理学家也只有一个模糊的概念。他们当然希望创建一个满足物理定律、囊括云团内部和外部所有影响条件的计算机模型，利用它来追踪大型星际云团内部的动力学变化，研究相关化学反应，但直到目前，我们仍无法完成这样的目标。更困难的地方在于，初始云团的尺寸比我们试图创造的恒星大几十亿倍，反过来说，最终诞生的恒星平均密度是初始云团的千万兆倍。这样一来，在原来的尺度下至关重要的一些因素可能变得无足轻重。

无论如何，根据我们在宇宙中观察到的现象，我们可以很有把握地说，在恒星际云团最黑暗、最致密的最深处，温度低于10K的区域中，引力的确有可能轻松克服磁场和其他阻碍因素，导致气团坍塌。这样的坍塌会使气团蕴含的引力势能转化为热，在这个过程中，坍塌区域（它们很快就会变成新生恒星的核心）内部的温度迅速上升，撕裂附近的所有尘埃微粒。气团坍塌核心区域的温度最终会达到1000万K以上的临界值。

在这个温度下，部分质子（它们其实就是被剥夺了所有外层电子的赤裸氢原子）的运动速度足以克服它们彼此之间的斥力。这样的高速运动让质子彼此靠近到了能让“强核力”发挥作用的程度。强核力只有在极短的距离上才能起效，正是这种力将每一个原子核内部的质子和中子凝聚在一起。质子的热核聚变会产生氦原子核——之所以叫“热核聚变”，是因为这种反应在温度极高的环境中才能发生，它会将多个微粒凝聚成一个原子核，每个氦原子核的质量都比参与反应的微粒总质量轻一点。根据爱因斯坦那个著名的方程，聚变过程中消失的质量转化成了能量。质量中蕴含的能量（它总是等于质量乘以光速的平方）可以转化为其他形式，例如，核聚变反应产生的高速运动粒子携带的额外动能（运动的能量）。

核聚变制造出的新能量不断向外扩散，被加热的气体开始发光。聚变释放的能量将气体加热到几千摄氏度的高温，接下来，这些曾被紧锁在原子核内部的能量通过恒星表面以光子的形式散入宇宙空间。虽然这片弥漫着灼热气体的区域仍蜷缩在巨型星际云团的子宫里，但我们或许可以向整个银河系宣布：一颗恒星诞生了。

天文学家知道，恒星的质量悬殊，从太阳的1/10到近100倍不等。出于一些我们尚不理解的原因，一个巨型气体云团能够孕育出不止一个冷囊，这些冷囊常常同时坍塌，由此制造出或大或小的恒星。不过从统计学的角度来说，小恒星的数量更多：每颗大质量恒星背后都有1000颗小质量恒星。事实上，初始气团内的气体只有一小部分参与了恒星的孕育，所以要解释恒星的形成，我们面临一个经典问题：星际气体云形成恒星的过程为什么总是大同小异？答案可能藏在新生恒星释放的辐射之中，这些辐射往往会抑制恒星的进一步形成。

我们可以轻松解释恒星的质量下限。如果坍缩冷囊中的气体质量小于太阳质量的1/10左右，那它蕴含的引力势能就无法将核心温度提升到氢核聚变所需的1000万摄氏度以上。在这种情况下，气团无法孕育核聚变恒星；取而代之，我们将看到一颗有缺陷的准恒星，天文学家称之为“棕矮星”。棕矮星自身无法制造能量，气团坍塌产生的少许热量的确会让它发光，但接下来它的亮度会稳定衰减。棕矮星的气态外层温度很低，所以在普通恒星灼热的大气中难觅踪影的很多大分子得以幸存下来。棕矮星的亮度很低，所以我们很难探测到它的存在，为了寻找棕矮星，天体物理学家不得不采用一些平常用于探测行星的复杂办法，比如，搜寻这些天体发出的微弱红外线。直到最近几年，天文学家才发现了能分成多个类别的大量棕矮星。

我们也可以轻松确定恒星形成的质量上限。如果一颗恒星的质量超过太阳的100倍左右，它就会显得太亮。换句话说，以可见光、红外线和紫外线的形式向外释放的能量太多。外部的气体和尘埃一旦靠近就会被星光的强大压力推走。恒星释放的光子也会推挤云团内部的尘埃微粒，于是这些微粒就会携带着气体离开恒星。在这种情况下，星光不可逆地化作了尘埃。辐射造成的压力如此有效，所以晦暗模糊的云团中只有极少数的大质量恒星能够发出足以驱散几乎所有恒星际物质的耀眼光芒，让整个银河系看到数十颗甚至数百颗全新的恒星。

你应该仰望过天空中的猎户座星云，组成猎人腰带的3颗亮星下方就有这么一片孕育恒星的温床，它大约位于猎人那柄晦暗的佩剑中间。这片星云已经孕育了数以千计的恒星，未来还将有数千颗恒星在这里诞生；很快它们就将形成一个巨型恒星团，随着星云渐渐散去，恒星团将变得越来越清晰。大部分新恒星组成的“猎户四边形星团”正忙着在自己诞生的星云中央吹出一个大洞。通过哈勃望远镜拍摄的照片，我们单单在这片区域里就发现了几百颗新恒星，这些婴儿恒星依偎在尘埃和来自

星云的其他分子组成的盘状结构中，每个盘状结构都孕育着一个行星系。

直到银河系形成100亿年后的今天，我们的星系里还有很多地方仍在孕育恒星。虽然对银河系这样的巨型星系来说，大规模孕育恒星的阶段早已结束，但幸运的是，从现在到几十亿年后的将来，我们仍能看到新的恒星不断诞生。人类的幸运之处在于，我们有能力研究恒星的形成过程和刚刚诞生的新恒星，追寻冰冷的气体和尘埃慢慢发育为成熟恒星的完整故事。

恒星的年龄有多大？这些星星可不会把自己的岁数写在袖口上，但光谱会透露它们的年龄。天体物理学家可以通过多种方式判断恒星的年龄，但光谱分析法提供的证据最为可靠。每种颜色——我们观察到的每一种频率和波长的光波——都会讲述一个关于物质和星光的故事，比如，特定物质如何制造出特定颜色的光，或者物质如何影响离开恒星的光，又或者在星光进入我们的眼睛之前，宇宙中的物质对它做了点儿什么。将星光和实验室里的光谱进行严格的比对之后，物理学家确定了不同类型的原子和分子影响可见光颜色的多种方式。利用这方面的丰富知识，他们可以根据恒星光谱的观测结果推测影响特定恒星星光的原子和分子数量，以及这些微粒的温度、压力和密度。多年来，天体物理学家反复比对实验室光谱和恒星的光谱，还在实验室里深入研究了各种原子和分子的光谱，现在他们学会了解读天体的光谱。星光就像天体的指纹，它会告诉我们恒星外层的物理条件，这里是星光进入太空的直接通路。除此以外，天体物理学家还可以根据我们观察到的星光，判断飘浮在温度远低于恒星表面的恒星际空间中的原子和分子对光谱产生的可能影响，进而推测恒星际物质的成分、温度、密度和压力。

在光谱分析的领域中，每种原子或分子都有自己的故事。比如说，如果我们在星光光谱中观察到了任何分子的特征谱线，这就意味着该恒星外层温度必然低于3000摄氏度。如果温度高于这个值，快速运动的分子就会在碰撞中崩裂形成独立原子。将这样的分析手段应用于多种不同的环境，天体物理学家就能描绘出一幅近乎完整的恒星大气特性图景。辛勤的天体物理学家对自己热爱的恒星光谱了如指掌，甚至超过了他们对自己家人的了解。这可能影响他们的人际关系，但他们的工作的确增进了人类对宇宙的了解。

在所有的自然元素——能在恒星光谱中创造出特定谱线的各种原子——中，天体物理学家主要利用一种来确定年轻恒星的年龄，它就是周期表中排行第三的锂元素。有的人可能对锂相当熟悉，因为它是一些抗抑郁药的活性成分。锂在元素周期表里正好排在氢和氦后面，但这两种元素的名气比锂大得多，因为它们在宇宙中的丰度远高于锂。宇宙诞生之初的几分钟里，大量氢元素聚变形成氦核，形成更重原子核的氢相对来说要少得多。因此，锂是一种相当罕见的元素，它在天体物理学家的心目中之所以地位特殊，是因为恒星几乎不会制造锂，只会摧毁它。宇宙中的锂一直在稳定减少，因为在每一颗恒星内部，摧毁锂的核聚变反

应都比制造锂的反应更活跃。如果你想弄点儿锂，最好现在就下手。

对天体物理学家来说，这个简单的事实让锂成了判断恒星年龄的实用工具。所有新生恒星的锂含量都完全相同，那是在宇宙诞生之初那半个小时和大爆炸留下的遗泽。这个比例到底是多少呢？大约1000亿个原子核里就有1个锂原子核。新生恒星含有这么“丰富”的锂，但恒星核内的核反应会缓慢地消耗锂原子核，所以它的浓度会稳步下降。恒星内层和外层的物质不断混合、交换，所以等到几千年后，我们就能通过恒星外层的情况推测恒星核内曾经发生的事情。

因此，天体物理学家寻找新生恒星时总是遵循一条简单的规则：锂浓度越高的恒星就越年轻。仔细研究恒星的光谱，天体物理学家可以确定该恒星包含的锂原子核与（比如说）氢原子核的数量比，接下来，他们可以根据图表查出锂浓度对应的恒星年龄。利用这种方法，天体物理学家能够颇有把握地找出星团中最年轻的恒星，进而根据锂的浓度推测每颗恒星的年龄。由于恒星会不断摧毁锂，随着恒星年龄的增长，它的锂浓度会一直降低，直至于无，所以这种方法只适用于年龄不超过几亿岁的恒星。不过在研究年轻恒星时，利用锂来判断年龄的方法非常好用。天文学家研究了猎户座星云里24颗质量与太阳相当的年轻恒星，发现它们的年龄范围是100万岁到1000万岁。未来的天体物理学家或许能够准确分辨更年轻的恒星，不过现在，100万岁差不多就是我们辨认恒星年龄时的极限了。

除了驱散孕育自己的气体“茧壳”以外，在很长的一段时间里，新生的恒星团不会带来任何麻烦，它们静静地将恒星核内的氢聚合成氦，同时不断摧毁锂原子核。但世事无常，几百万年的漫长时间里，恒星团附近不断掠过的巨型云团带来的引力扰动会导致大部分准星团“蒸发”，而它的成员会散落到星系里，成为无数恒星中的一颗。

太阳形成约50亿年后，它的兄弟姊妹都已消失。但银河系和其他星系里总有一些质量特别小的恒星，它们消耗燃料的速度极慢，这样的恒星近乎永生。中等质量的恒星（例如，我们的太阳）最终会变成红巨星，在走向死亡的过程中，它们的外层大气会扩张到原来的数百倍。扩散后的稀薄大气飘向宇宙空间，暴露出此前100亿年里一直为恒星提供能源的燃尽的恒星核。从太阳系附近掠过的云团会带走散佚的气体，这些气体又会投入下一轮的恒星形成过程中。

尽管大质量恒星十分罕见，但演化的所有王牌都捏在它们手里。大质量赋予了这些恒星最高的亮度，某些大质量恒星比太阳亮100万倍。它们消耗核燃料的速度比小质量恒星快得多，所以它们的寿命比其他任何恒星都短：大质量恒星可能只能活几百万年，甚至更短。大质量恒星内部持续的热核聚变依次制造出越来越重的几十种元素，从氢到氦，然后是碳、氮、氧、氖、镁、硅、钙，直到铁为止。垂死的大质量恒星最

后爆发的烈焰足以短暂地照亮整个星系，天体物理学家称之为“超新星爆发”。超新星爆发看起来有点像我们在第五章中提到过的Ia型超新星，但二者背后的机制完全不同。灼热的烈焰熔炼出更多的元素，爆炸的能量将所有元素撒向整个星系，附近的气团被狂风吹出一个个大洞，超新星带来的原材料弥漫在气团内部，开始形成新的尘埃微粒。超声速爆炸激波掠过恒星际云团，对气体和尘埃产生巨大的压力，这可能会创造出恒星成形所需的高密度囊袋。

除了氢和氦以外的其他所有元素是超新星送给宇宙的大礼——行星、原生生物和人类都是由这些元素组成的。我们脚下的地球是数十亿年前无数恒星爆炸的产物，在那个遥远的年代，我们的太阳和整个太阳系都还没有诞生，它们的雏形仍包裹在一片昏暗的星际云团中——这片云团正是之前的大质量恒星爆发后留下的富含化学元素的余烬。

氦之后的所有元素都诞生于恒星内部，我们是怎么发现这一点的呢？本书作者认为，20世纪最被低估的科学发现是，科学家认识到，超新星爆发——大质量恒星辉煌的死亡——为宇宙带来了丰富的重元素。1957年，这个被埋没的珍贵观点发表在美国期刊《现代物理评论》（*Reviews of Modern Physics*）上一篇题为《恒星内的元素合成》（*The Synthesis of the Elements in Stars*）的冗长论文里，论文作者是E.玛格丽特·伯比奇（E. Margaret Burbidge）、杰弗里·R.伯比奇（Geoffrey R. Burbidge）、威廉·福勒（William Fowler）和弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）。在这篇论文中，四位科学家建立了一个理论计算框架，融会贯通了40年来其他科学家在两个重要议题上的思考成果：恒星能量的来源和化学元素的嬗变。

宇宙核化学向来是个麻烦的领域，这门学科研究的是核聚变如何制造、摧毁各种原子核。这个领域的关键问题包括：各种元素在不同的温度和压强下作何表现？它会聚变还是裂变？聚变或裂变的难度有多大？这个过程是会释放新的动能还是会吸收已有动能？周期表中的各种元素发生的反应有何不同？

对你来说，元素周期表意味着什么？如果你和以前的大部分学生一样，那你应该记得科学教室墙上挂的巨幅表格，神秘的方格子里晦涩难懂的字母和符号喃喃讲述着青春期年轻人完全不感兴趣的老掉牙的实验室故事。不过对那些深谙其中奥秘的人来说，这张表格讲述着宇宙中元素诞生的无数惊心动魄的故事。周期表按照原子核内质子数升序列出了宇宙中的所有已知元素。最轻的两种元素是氢和氦，它们的每个原子核分别包含了一个或两个质子。正如1957年那篇论文的四位作者所说，在适当的温度、密度和压力条件下，恒星能利用氢和氦创造出周期表中的其他所有元素。

核化学深入讨论的正是这个创造过程和其他摧毁（而非创造）原子

核的互动反应，科学家利用“碰撞截面”，通过计算确定两个粒子必须接近到何种程度才可能发生明显互动。物理学家可以轻松算出水泥搅拌车或者拖在平板卡车后面沿街行驶的活动房屋的碰撞截面，但要分析神出鬼没的亚原子微粒的行为，那就完全是另一回事了。物理学家必须详细了解碰撞截面，才能预测核反应的速率和路径。截面表里小小的不确定性常常带来谬以千里的结果。这种模拟计算的困难之处有点像是拿一座城市的地铁路线图去另一座城市的地铁系统里找路：你的基本理论完全正确，但魔鬼藏在细节里。

尽管20世纪上半叶的科学家并不知道准确的碰撞面积，但长久以来他们一直怀疑，如果宇宙中的确存在奇异的核过程，那它很可能发生在恒星中央。1920年，英国理论天体物理学家亚瑟·爱丁顿爵士（Sir Arthur Eddington）发表了一篇题为《恒星内部结构》（*The Internal Constitution of the Stars*）的论文，他在这篇文章中提出，英格兰的卡文迪许实验室（当时最先进的核物理研究所）很可能并不是宇宙中唯一能将某些元素转化为其他元素的地方：

但是，这样的嬗变是否真的有可能发生？对于这样的事情，我们很难给出肯定的回答，但恐怕更难否认……在太阳内部重现卡文迪许实验室的成就或许不算太难。恒星就像坩埚，星云里丰富的氢原子在恒星内部合成更复杂的元素，我认为这个想法十分有趣。

爱丁顿的论文为四位科学家后来的详细研究提供了一个引子，几年后问世的量子力学又让我们得以深入理解原子和原子核的物理机制。接下来，爱丁顿开始描绘恒星通过热核聚变，以氢为原料生成氦和其他更重元素，同时向外释放能量的过程。以我们今天的眼光去看，他的描述准确得惊人：

我们不能狭隘地认为，氢生成氦的过程就是（恒星内部）唯一的供能反应，虽然乍看之下，进一步生成其他元素的过程释放的能量比第一步少得多，有时候甚至还会吸收能量。我们或许可以这样描述恒星的地位：所有元素的原子实际上都是聚合在一起的氢原子，而且它们很可能是由多个氢原子一次性形成的。恒星内部似乎就是发生这种变化的理想地点。

任何元素嬗变模型都必须解释一个现象：无论是在地球上还是在宇宙中的其他地方，我们为什么会发现这么多五花八门的元素。要完成这个任务，物理学家必须弄清恒星将一种元素转化为另一种元素，同时产

生能量的基本过程。到了1931年，量子力学理论已经发展得比较完善（尽管当时我们还没发现中子），英国天体物理学家罗伯特·德艾斯科特·阿特金森（Robert d'Escourt Atkinson）发表了一篇系统性论文，一言以蔽之，这篇论文提出了一套“恒星能量及元素的合成理论……恒星内部较轻的元素循序渐进地合成其他各种化学元素，每一步都有新的质子和电子融入其中”。

同一年，美国核物理学家威廉·D.哈金斯（William D. Harkins）在一篇论文中提出：“原子量（每个原子核内的质子数和中子数之和）较小的元素丰度大于那些更重的元素，平均来说，原子序数（每个原子核包含的质子数量）为偶数的元素丰度差不多10倍于那些原子量近似，但原子序数为奇数的元素。”哈金斯猜测，某些元素的丰度之所以相对较高，很可能是因为它们来自核聚变过程而非燃烧之类的化学过程，而且重元素一定是由轻元素合成的。

复杂的恒星核聚变过程可以从根本上解释宇宙中许多元素的来源，尤其是那些由前一种元素加上两个质子和两个中子（一个氦核）生成的元素，也就是哈金斯描述的丰度相对较高的“原子序数为偶数”的元素。但这套理论仍无法解释其他很多元素的存在及其丰度。所以宇宙中一定存在其他的元素形成机制。

1932年，英国物理学家詹姆斯·查德威克（James Chadwick）在卡文迪许实验室工作时发现了中子，爱丁顿不可能想到，这种微粒在核聚变过程中扮演着至关重要的角色。组装质子是件难事，因为和所有电性相同的微粒一样，质子天然互相排斥。要将质子熔炼到一起，你必须让它们靠得足够近（通常需要高温、高压和高密度条件），强核力才能战胜质子之间的斥力，将它们融为一体。但不带电的中子不会对其他微粒产生斥力，所以它可以大摇大摆地闯进别人的原子核里，在强核力作用下与已经组装完毕的其他微粒融合到一起。这个过程不会创造出新的元素，因为原子核内的质子数才是区分不同元素的标志。给原子核添加一个中子，我们得到的是初始元素的“同位素”，它和初始原子核只有非常细微的差别，因为它携带的总电荷并未发生改变。对某些元素来说，新俘获的中子会让原子核变得不稳定。在这种情况下，被俘获的中子会自发地转化成一个质子（它会继续停留在原子核内）和一个电子（它会立即逃逸出去）。通过这种方式，质子可以披着中子的外衣毫不费力地溜进原子核里，就像希腊士兵藏在木马里攻陷特洛伊城。

如果中子束始终保持较高的强度，那么在进入原子核的第一个中子发生衰变之前，原子核能够吸收多个中子。很多元素就是通过这样的“快中子俘获过程”创造出来的，它不同于我们刚才介绍的慢中子俘获过程——在这种情况下，原子核要等到俘获的前一个中子衰变后才会吸收下一个中子。

快中子俘获过程和慢中子俘获过程都能辅助形成大量新元素，为传统的热核聚变拾遗补漏。除此以外，自然界中还有一部分元素来自其他

几种过程，比如，高能光子（γ射线）会轰击重原子，将后者撞成碎片，从而产生新的元素。

我们或许可以说，每颗恒星的生命都源自其内部制造、释放能量的过程，这样的过程帮助恒星克服引力作用，维持自身存在，尽管这样的描述大大简化了大质量恒星的生命周期。如果没有热核聚变产生的能量，球状的气态恒星必将被自己的重量压垮。恒星核内氢原子核（质子）耗尽的衰老恒星注定会迎来这样的结局。正如我们之前提到的，大质量恒星将自己内部的氢转化为氦以后，还会进一步将氦转化为碳，然后碳变成氧，氧变成氖，如此循序渐进，直至最后生成铁。在这个环环相扣的聚变过程中，每往前多走一步，恒星都需要达到更高的温度才能克服原子核内质子的天然斥力。幸运的是，这些反应都是自发进行的，因为在每一个中间阶段走向尾声的时候，恒星的能量来源都会暂时枯竭，导致恒星中央区域收缩、温度上升，由此引发聚变的下一环。但世事无常，恒星最终会遇上一个大问题：铁的聚变不会释放能量，反而会吸收能量。对恒星来说，这真是个坏消息，它不能继续从核聚变的帽子里掏出新的能量释放过程来对抗引力了。于是恒星会突然坍缩，迫使自己内部的温度急速上升，接踵而来的爆炸会将整颗恒星炸得粉碎。

每一次超新星爆炸的过程中，质子、中子和能量都会以多种方式创造元素。在1957年的那篇论文里，四位作者结合多种因素——（1）久经考验的量子力学原理；（2）爆炸的物理规则；（3）最新的碰撞截面；（4）元素嬗变的各种过程；（5）恒星演化的基本理论——最终得出结论，宇宙中比氢和氦更重的所有元素都源自超新星爆发。

重元素来自大质量恒星，而超新星爆发将这些元素撒遍宇宙，于是四人组顺理成章地解开了另一个问题：我们在恒星核里熔炼出比氢和氦更重的元素以后，还得设法将所有元素散播到恒星际空间中，这些原材料才有可能形成我们这个有树袋熊的世界，超新星爆发完成的正是这项任务。四位科学家将我们对恒星核聚变过程的理解和宇宙中看得见的元素诞生过程融合到了一起。几十年来，他们的结论历经考验仍屹立不倒，时至今日，四人组的这篇论文已经成了我们理解宇宙机制的一块里程碑。

是的，地球和地球上的所有生命都来自星尘，但宇宙化学领域还有很多未解之谜，其中一个有趣的谜题与锝有关。1937年，人类在地球上的实验室里创造出了第一种人造元素锝（锝的英文名是Technetium，前缀tech来自希腊语中的technetos，意思是“人造的”）；我们还没有在地球上发现天然锝，但天文学家已经在银河系内极少数红巨星的大气层里找到了这种稀有元素。红巨星中存在锝倒是不足为奇，但考虑到锝会衰变成其他元素，而且它的半衰期只有200万年，远低于这些恒星的预期寿命，这件事就显得有些古怪了。为了解开这个谜题，天体物理学家提出了种种稀奇古怪的解释，但目前还没有哪种解释能得到学界的公认。

虽然这种化学性质特殊的红巨星为数不多，但也足以吸引一群天体

物理学家（主要是光谱学家）专门研究这个主题，他们甚至为此创办了一份报纸：《化学性质特殊的红巨星新闻通讯》（*Newsletter of Chemically Peculiar Red Giant Stars*）。当然，这份报纸不会出现在普通的书报摊上，它主要刊登该领域的会议新闻和最新研究进展。对感兴趣的科学家来说，这些未解的化学谜题吸引力不亚于黑洞、类星体和早期宇宙。但你在其他地方很难读到这方面的内容。为什么呢？因为一般来说，媒体会替你决定哪些主题值得一看，哪些不值得。显然，对它们来说，地球和你身体里的每一种元素来自宇宙中的什么地方，这类问题完全不值得关注。

现在，你有机会反抗当代社会强加给你的预判。我们不妨在元素周期表中漫步一番，时不时停下脚步，关注各种元素最有趣的故事，畅想宇宙如何利用大爆炸产生的氢和氦制造出其他所有元素。

第十章　元素动物园

过去200年来，化学家和物理学家怀着满腔爱意编制了元素周期表，这份表格形象地体现了宇宙中已知（和未来某天有可能发现的）所有元素的基本行为和性质。从这个意义上说，我们应该将元素周期表视为一个文化符号，它象征着我们的社会整理、组织知识的能力。周期表的存在证明了人类科学事业是一项国际性的探险之旅，我们绝不会躲在实验室里故步自封，科学家探索的脚步必将踏遍宇宙，从粒子加速器到时空的边疆。

尽管我们已经给予了元素周期表足够的重视，但它仍时时为我们带来惊喜。周期表中的某些元素常有出人意料的一面，就连成年的科学家也不免为之震惊，它们就像苏斯博士[2]笔下的珍奇异兽，悠游自在地生活在一座特殊的动物园里。比如说，钠是一种足以置人于死地的活泼金属，你可以用一把黄油刀轻松将它切开，而纯氯是一种气味糟糕的致命气体，但将钠和氯结合到一起，我们就得到了氯化钠，这种无害的化合物对生命至关重要，它有一个更广为人知的名字：食盐。还有氢和氧，无论是在地球上还是在宇宙中，这两种元素都大量存在。氢是一种爆炸性气体，氧能为燃烧提供关键的助力，但这两种元素组成的水却能灭火。

周期表中各种元素之间可能发生的化学交互作用无穷无尽，在这间小小的奇迹商店里，我们挑出了宇宙中最重要的那些元素，它让我们能够以天体物理学家的视角重新审视元素周期表。我们应该抓住这个机会，在这张表格中自在遨游，欣赏这个小世界的独特风景和奇异特性。

根据元素周期表的基本规则，自然界的每种元素都有独一无二的“原子序数”，即该元素每个原子核内的质子（携带正电荷）数量。与质子数量相同的电子（携带负电荷）绕着原子核旋转，它们共同组成了电中性的完整原子。特定元素的多种同位素拥有相同的质子数和电子数，但它们的中子数各不相同。

氢元素的每个原子核内只有一个质子，作为最轻、最简单的元素，它诞生于大爆炸后的最初几分钟。目前我们在自然界中一共发现了94种元素，氢原子占据了人体总原子数的2/3，而宇宙中90%以上的原子都是氢原子，包括太阳和太阳系的各大行星。木星是太阳系内最大的行星，木星核内的氢承受着外层物质的巨大压力，所以它表现出来的性质更像是电磁传导性能优异的金属而非气体，正是这些氢原子造就了木星的强大磁场。1766年，英国化学家亨利·卡文迪许（Henry Cavendish）在用水（H_2O，“氢”的英语单词hydrogene在希腊语中的意思是“形成

水”，其中“gen”这个后缀代表“起源”）做实验的时候发现了氢，对天文学家来说，卡文迪许最重要的成就是，他首次测量了牛顿引力方程中的重力常数G，进而准确算出了地球质量。无论是白天还是夜晚，在温度高达1500万摄氏度的太阳核心里，每一秒都有45亿吨高速运动的氢原子核（质子）融合形成氦原子核。在这个聚变过程中，大约1%的质量会转化为能量，剩余99%的质量则以氦的形式继续存在。

氦是宇宙中第二丰富的元素，但在地球上，它只存在于地下的少量孔洞中。大部分人只知道氦气是一种有趣的恶作剧道具：氦气的密度低于普通空气，所以当你吸入氦气的时候，它会改变气管的振动频率，让你说话的声音变得像米老鼠一样。宇宙中氦的含量相当于（除了氢以外）其他所有元素之和的4倍。大爆炸宇宙学有一个基本预测：整个宇宙中氦原子的占比不低于8%，它们源自大爆炸之后那团均匀的原初火球。由于恒星内部的热核氢聚变还在继续制造额外的氦，所以宇宙中某些区域的氦含量会高于最初的8%，但是，正如大爆炸模型所预测的，截至目前，我们还没有在银河系或者其他任何星系中发现氦含量低于8%的地方。

1868年，天体物理学家观察日全食时的太阳光谱，发现了太阳中的氦，差不多30年后，他们才成功发现并分离出了地球上的氦。既然最初发现的氦来自太阳，所以科学家顺理成章地将希腊太阳神赫利厄斯（Helios）的名字赋予了这种未知的物质。氦气能提供的浮力相当于氢气的92%，而且它不像氢气那样容易爆炸，所以绝不会引发德国兴登堡号空难那样的悲剧。于是梅西百货选择了用氦气来充填感恩节游行的巨型气球，这家著名百货公司也因此成了仅次于美国军方的全球第二大氦气消耗者。

锂是宇宙中第三简单的元素，它的每个原子核里有3个质子。与氢和氦一样，锂也诞生于大爆炸之后不久，和氦不一样的是，时至今日，恒星内部的核反应还会不断生成氦，但这些反应却只会摧毁锂。早期宇宙中的锂丰度相对较低（总含量不超过0.0001%），所以宇宙中任何区域或天体内的锂含量都应该不高于这个值。截至目前，我们的确没有找到锂含量高于这个上限的星系，现实与大爆炸理论最初半小时的元素形成模型达成了完美的契合。氦含量下限和锂含量上限为我们提供了验证大爆炸宇宙学理论的双重约束条件。类似的验证条件还有一个，即宇宙中氘核（它由一个质子和一个中子组成）与普通氢核的相对比例。大爆炸之后最初几分钟的聚变会同时生成这两种原子核，但简单的氢核（它只有一个质子）比氘核多得多。根据天文学家对宇宙的观察，大爆炸理论的这个预测也得到了证实。

和锂一样，周期表里接下来的两种元素铍和硼（每个原子核内分别有4个和5个质子）主要来自早期宇宙的热核聚变，它们在宇宙中的丰度相对较低。氢和氦之后这三种最轻的元素在地球上都很稀少，对于不小心吃下了锂、铍或者硼的动物来说，这可真是个坏消息，因为整个地球生命的演化过程基本彻底绕过了这三种元素。但有趣的是，一定剂量的

锂的确能缓解某些精神疾病。

6号元素碳在元素周期表中大放光彩。每个碳原子的原子核内有6个质子，包含碳的分子比不包含碳的所有分子加起来还多。碳核在宇宙中广泛存在——恒星核会制造出大量碳原子核，奔涌的能量将这些碳送往恒星表面，再撒向整个银河系——再加上碳元素的化学性质十分活泼，很容易跟其他元素结合形成分子，所以碳是化学领域最基本的元素之一，它为生命的多样性做出了不可磨灭的贡献。除了碳以外，8号元素氧（每个原子核内有8个质子）也是一种高丰度活泼元素，衰老的恒星和爆发的超新星都会制造、散播氧元素。对我们所知的所有生命来说，氧和碳都是不可或缺的基本物质。与这两种元素类似，制造、散播7号元素氮的过程在宇宙中也很常见。

除了我们熟知的生命形式以外，还有其他形式的生命吗？会不会存在一些完全基于另一种元素的生命，比如14号元素硅？元素周期表中硅的位置在碳的正下方，这意味着（看看，对于那些知晓元素周期表秘密的人来说，这张表格是多么有用啊）硅能够取代碳的位置，生成结构类似的化合物。但是，我们希望证明碳的性质比硅优秀，不光是因为宇宙中碳的丰度是硅的10倍，还因为与碳形成的化学键相比，硅形成的化学键要么太强，要么太弱。尤其是考虑到，硅和氧的化合物是坚硬的岩石，所以硅基复杂分子缺乏碳基分子的韧性，难以承担演化带来的生存压力。但这些事实无法改变科幻作家对硅的偏爱，他们不断发挥想象力，从天体生物学的各种角度揣想，我们第一次看到的外星生命到底会是什么样子。

除了充当食盐中的活性成分以外，11号元素钠（每个原子核内有11个质子）还会发光——很多市政路灯里都充填着灼热的钠蒸汽。比起传统的白炽灯，钠灯亮度高、寿命长、能耗低。钠灯分为两种，普通的高压钠灯的光是黄白色的，比较罕见的低压钠灯发出的是橙光。人们发现，尽管光污染深深困扰着天文学家，但低压钠灯带来的危害相对较小，因为它发出的光频段较窄，科学家在处理望远镜数据的时候可以比较轻松地消除它带来的干扰。目前，天文台和城镇已经摸索出了一种合作模式。比如，作为基特峰国家天文台附近最大的城市，亚利桑那州图森市与当地天文学家达成协议，将城市里所有路灯都换成了低压钠灯。由于低压钠灯的发光效率更高，这一举措也为城市节约了能源。

13号元素铝（每个原子核拥有13个质子）在地壳中的占比接近10%，但古人对这种元素几乎一无所知，直到我们的爷爷那一辈，铝还是件稀罕物，因为它通常以化合物的形式存在。1827年，人类第一次分离、鉴别了铝；直到20世纪60年代末，铝才真正进入千家万户，厨房里的马口铁罐头和锡箔纷纷换成了铝罐和铝箔。抛光的铝可以近乎完美地反射可见光，所以今天的天文学家几乎给所有望远镜的镜片都镀了一层薄薄的铝膜。

虽然钛（每个原子核内有22个质子）的密度只比铝高70%，但它的

强度是后者的两倍以上。较高的强度和相对较轻的重量让钛——地壳中丰度排名第九的元素——成了现代工业的宠儿，很多地方都离不开这种坚固的轻质金属，譬如军用飞机上的零部件。

宇宙中很多地方的氧原子都比碳原子多。恒星内部的每个碳原子都会和氧原子牢牢地结合在一起，形成一氧化碳或二氧化碳；多余的氧原子会和其他元素结合，譬如钛。科学家在红巨星的光谱里观察到了二氧化钛（TiO_2分子）的特征谱线，其实地球上也有这样的星光：星光红蓝宝石的放射状星芒都来自晶体内包含的二氧化钛杂质，氧化铝杂质又为这些宝石增添了额外的色彩。此外，粉刷天文台穹顶的白色涂料里也有二氧化钛，这种化合物能够有效地反射红外线，从而在白天显著降低穹顶内的温度。等到夜晚降临，穹顶打开，望远镜附近的空气温度就能迅速下降到接近环境温度，从而减少大气折射带来的干扰，进入望远镜的星光和其他天体的光芒也会变得更锐利、更清晰。“钛”的英文名“Titanium”来自希腊神话中的泰坦巨人，虽然这个名字和宇宙没有直接的关系，但土星最大的卫星也叫泰坦。

碳可能是生命领域最重要的元素，但从很多角度来说，宇宙中最重要的元素应该是26号元素铁。大质量恒星在自己的核心中熔炼元素，按照周期表的顺序制造出越来越大的原子核，从氦到碳，再到氧和氖，直到铁为止。铁原子核拥有26个质子和至少等量的中子，质子和中子依照量子力学原理相互作用，造就了铁元素的独特性质：铁原子核内的粒子（质子或中子）拥有最高的核结合能。这背后蕴藏着一个简单的事实：如果你想分裂铁原子核（物理学家称之为“裂变”），那么你必须为它们提供额外的能量。从另一个方面来说，如果你想让铁原子核融合在一起（这个过程叫作“聚变”），它们也得吸收能量。因此，铁原子核的聚变和裂变都需要吸收能量，但对其他元素来说，需要吸收能量的过程只有一种，要么是裂变，要么是聚变。

不过，恒星都忙着利用质能方程$E=mc^2$将质量转化为能量，它们必须依靠这个过程来抵抗引力才不会坍缩。所以从本质上说，恒星在自己的核心内聚合原子核的时候，它需要的是释放能量的聚变过程。等到大质量恒星将核心内的大部分原子核聚合成铁以后，通过热核聚变获得能量的路就走到了头，因为铁的聚变是一个消耗能量的过程。失去了热核聚变提供的能量，恒星核会在自身引力作用下坍缩，然后迅速反弹，由此引发一场惊天动地的爆炸，我们称之为超新星爆发。比10亿颗太阳还亮的光芒将持续照耀一周以上。超新星爆发之所以会出现，完全是因为铁原子核的独特性质——无论是聚变还是裂变它都无法向外释放能量。

刚才我们依次介绍了氢、氦、锂、铍、硼、碳、氮、氧、铝、钛和铁，它们是组成宇宙和地球生命的关键元素。

不过，为了一窥宇宙的复杂之处，我们不妨再看看周期表中某些不那么显眼的成员。你或许从不曾拥有过这些元素，但科学家发现，它们不光能满足探索者的好奇心，还能在某些特殊环境中发挥巨大的作用。

比如说，我们可以看看柔软的金属元素镓（每个原子核拥有31个质子）。镓的熔点极低，你只需要把它握在手里，它就会化为液体。除了充当客厅魔术道具以外，镓还能与氯结合形成氯化镓，这种化合物结构类似食盐（氯化钠），它能帮助天体物理学家探测来自太阳核心的中微子。为了捕捉神秘的中微子，天体物理学家将100吨氯化镓液体装在一个大桶里，然后将这个桶安置在地底深处（这是为了隔绝其他穿透力更弱的粒子），仔细观察中微子与镓原子核是否发生了碰撞，中微子的撞击会将镓原子核变成拥有32个质子的锗原子核。每个转化成锗的镓原子核都会释放出X射线光子，通过这种方式，科学家能够探测中微子与原子核发生的每一次碰撞。这种氯化镓“中微子探测器”帮助天体物理学家解决了所谓的“太阳中微子问题”：以前他们用别的中微子探测器测出的中微子数量总是远小于理论预测值，但换了氯化镓以后，这个问题就迎刃而解了。

锝（原子序数43）元素的原子核拥有放射性，它早晚会衰变成其他元素的原子核，但这个过程可能只需要片刻时间，也可能需要几百万年。不出所料的是，我们在地球上并未发现天然锝，只能利用粒子加速器人工制造这种元素。出于一些我们尚未完全理解的原因，锝存在于某些红巨星的大气层内。正如我们在上一章中提到的，锝的存在本来不足为奇，但考虑到锝的半衰期只有200万年，比这些恒星的寿命短得多，这事儿就显得有些古怪了。这些锝不可能从恒星诞生之初就已经存在，因为如果真是这样的话，现在它们早就衰变得一点儿不剩了。目前天体物理学家也不知道恒星核内有什么机制能制造出锝，并将它输送到能被我们观察到的恒星表面上，这个费解的谜题引来了许多异想天开的解释，但目前还没有哪种解释能得到学界的广泛认可。

锇、铂和铱是周期表中密度最大的三种元素。0.056立方米的铱（原子序数77）重量相当于一辆别克轿车，所以铱很适合用来做镇纸，它的重量足以对抗办公室里的任何风扇或者透窗而来的微风。除此以外，铱还为科学界提供了最著名的“冒烟手枪”。全球各地富含铱的地层组成了著名的“白垩纪-古近纪界线”，它形成于6500万年前，大部分生物学家相信，正是在这段时间里，所有体形大于面包盒的陆地动物（包括富有传奇色彩的恐龙）走向了灭绝。地球表面上的铱十分罕见，但某些金属小行星铱的丰度却是地球的10倍之多。不管你觉得恐龙灭绝的原因是什么，一颗直径16千米的杀手小行星的确能够掀起满天碎片，遮蔽全球阳光，它激起的尘埃要到几个月后才会慢慢散去——这套理论现在大受欢迎。

1952年11月，第一次氢弹试验在太平洋地区进行，后来物理学家在爆炸产生的碎片中发现了一种未知的元素，为了纪念爱因斯坦，他们将这种新元素命名为锿，不知爱因斯坦对此有何感想，或许这种元素该叫“末日审判”才更合适。

氦的名字来自太阳，除此以外，周期表中还有10种元素的名字来自绕太阳运行的天体：

磷，这个词在希腊语中的意思是“光的承载者”，古代人曾以此称呼金星，因为它总是出现在日出前的天空中。

硒的名字来自希腊语“selene”，意思是“月亮”。硒总是和碲伴生，而后者的名字来自地球的拉丁名“tellus”。

1801年1月1日，也就是19世纪的第一天，意大利天文学家朱塞普·皮亚齐（Giuseppe Piazzi）在火星和木星轨道之间大得令人生疑的间隙中发现了一颗新行星。遵照天文学界以罗马神祇命名行星的传统，皮亚齐以丰收女神之名将这颗行星命名为“谷神星”（Ceres），我们早餐吃的“麦片”英语词根也来自这个名字。皮亚齐的发现令科学界欣喜不已，所以科学家将他们发现的下一种元素命名为铈。两年后，又有人在这片区域内发现了另一颗绕太阳公转的行星，以罗马智慧女神之名，这颗新行星被命名为“智神星”（Pallas）；此后人们发现的第一种元素被命名为钯。接下来的几十年里，人们在同一片区域里又发现了几十颗类似的行星，但它们的体积都比已知最小的行星还要小得多，于是这场命名的盛宴终于走向了尾声。太阳系的房地产总平图上多出了一块全新的区域，这里的住客都是形状古怪的小块岩石和金属。原来谷神星和智神星都不是真正的行星，而是直径仅有几百千米的小行星，它们都位于小行星带。现在我们知道，小行星带有几百万个这样的天体，目前天文学家已经完成分类命名的小行星多达15000颗——比周期表里的元素种类多得多。

金属汞在室温下呈黏稠液态，它的名字来自罗马的飞毛腿信使之神。水星的名字也源于同一位神祇，它是整个太阳系内公转速度最快的行星。

钍的名字来自北欧神话中挥舞着锤子的雷神索尔，他对应的是罗马神话中掌管闪电的朱庇特（木星）。真正令人惊异的是，通过哈勃太空望远镜近期拍摄的木星极地照片，我们的确在这颗行星翻滚的云层里发现了闪电的痕迹。

虽然土星深受人们喜爱，却没有任何一种元素以它命名，而天王星、海王星和冥王星却在周期表里找到了各自的代言人。1789年发现的元素铀就是以天王星的名字命名的，8年前赫歇尔刚刚发现这颗行星。铀的所有同位素都不稳定，它们会缓慢地自发衰变成更轻的元素，同时向外释放能量。如果你能设法加速铀原子核的衰变速率，引发“链式反应”，那么你就掌握了制造炸弹的钥匙。1945年，美国在战场上引爆了第一颗铀弹（它更广为人知的名字是“原子弹”），日本城市广岛在爆炸中化为火海。每个铀原子核包含92个质子，所以铀是自然界中最大、最重的元素，不过我们也在铀矿中发现了痕量更大、更重的元素。

和天王星一样，海王星也拥有自己的代表元素。铀的命名距离天王星的发现只有8年，但人们直到1940年才在伯克利回旋粒子加速器里找到了镎，这时候距离德国天文学家约翰·伽勒（John Galle）发现海王星

已经过去了94年。海王星被发现之前，法国数学家约瑟夫·勒维耶（Joseph Le Verrier）已经算出了这颗行星在天空中的位置，天王星的轨道存在某些奇怪的特性，勒维耶认为，这是因为它受到了更远行星的影响。后来伽勒发现的海王星实际位置几乎完全符合勒维耶的预测。太阳系里的海王星紧挨着天王星，元素周期表里的镎也紧挨着铀。

粒子物理学家利用伯克利回旋加速器制造出了超过半打自然界中并不存在的元素，其中包括钚，这种元素得名于冥王星，它在周期表中的位置在镎的后面。1930年，年轻的天文学家克莱德·汤博（Clyde Tombaugh）在亚利桑那洛厄尔天文台拍摄的照片上发现了冥王星。和129年前皮亚齐发现谷神星时一样，人们为此激动不已。冥王星是美国人发现的第一颗行星，由于缺乏准确的观测数据，当时人们普遍认为这颗行星的尺寸和质量应该与天王星、海王星相当。随着观测技术的不断进步，我们估算出的冥王星的尺寸越来越小。直到20世纪70年代末，探索外太阳系的旅行者号任务期间，人类对冥王星尺寸的认知才算稳定下来。现在我们知道，冰冷刺骨的冥王星是太阳系内最小的一颗行星[3]，它的尺寸甚至比不上太阳系内最大的六颗卫星。与最初发现谷神星时一样，天文学家后来在同一片区域内发现了数以百计的其他天体；对于冥王星来说，外太阳系与它运行轨道相似的天体也不止一颗。它们的存在揭露了此前一直未被发现的小型冰冷天体的大本营，如今我们称之为“彗星的柯伊伯带”。纯粹主义者或许会提出，和谷神星、智神星一样，冥王星进入元素周期表也是一个误会。

和铀原子核一样，钚原子核也具有放射性。广岛核爆三天后，美国在日本长崎投放的另一颗原子弹迅速地结束了第二次世界大战，这颗炸弹包含的活性成分正是钚。由于钚能以稳定的速度持续产生温和的能量，科学家可以利用少量钚驱动放射性同位素热电发生器（英文缩写为RTG），为飞往外太阳系的飞船提供电力。因为外太阳系的阳光非常稀薄，太阳能电池板完全无法发挥作用。1磅钚能产生1000万度热能，足够让一幢房子里的电灯亮上1100年——一个人每天消耗的能量和一幢房子的电灯耗能差不多，如果不考虑身体老化，这么多能源足够让你活上1100年。1977年发射的两艘旅行者号飞船已经飞到了冥王星轨道以外，直到现在，它们仍在利用钚产生的能量向地球发送信息。其中一艘旅行者号飞船正在离开太阳释放的带电粒子形成的“气泡”，准备进入真正的恒星际空间，现在它和我们之间的距离差不多相当于地日距离的100倍。

所以，我们的太空之旅结束于化学元素周期表，结束于太阳系边缘。不知道为什么，很多人不喜欢化学，这或许可以解释多年来人们为什么锲而不舍地试图摆脱食物中的各种化学物，也许只是因为那些晦涩难懂的化学名称听起来太危险。但是，我们不应该因此而责怪化学家，更不该怪罪化学物。从个人层面上说，你应该对化学物深感亲切，因为无论是你深爱的星星还是你最亲密的挚友，宇宙中的一切都是由化学物质组成的。

卷四

行星的起源

第十一章　行星的青春年代

探索宇宙历史的过程中，我们不断发现，很多秘密都隐藏在各种各样的起源故事里——无论是宇宙本身的起源，还是宇宙中那些庞大结构（星系和星系团）的起源，或者照亮了整个宇宙的恒星的起源。每个起源故事都至关重要，它不光解释了看似无形无质的宇宙如何形成各种天体的复杂组合，还决定了大爆炸140亿年后的今天，生活在地球上的我们为什么会出这个问题：这一切是怎么发生的？

起源故事之所以如此神秘，很大程度上是因为在物质刚刚开始组织起来形成恒星、星系等独立单元的“黑暗年代”，大部分物质几乎完全不产生可探测的辐射。那个黑暗年代留下的痕迹少得可怜，我们只能凭借这些细微的线索摸索早期阶段的物质如何组织成形。这意味着我们很大程度上只能利用自己构建的理论来解释物质的行为，却很难通过观测数据来验证这些理论。

说到行星的起源，迷雾变得更加浓重。我们不光缺乏行星成形初期关键的观测数据，甚至连相对可靠的行星成形理论都还没有建立。不过还好，近年来，我们发现一个问题所指的范围正在变得越来越宽广：行星到底由什么组成？在20世纪大部分的时间里，关于这个问题的讨论主要围绕太阳系内的各大行星展开，但在20世纪和21世纪之交的几年里，天体物理学家在相对较近的恒星周围发现了超过100颗“系外”行星，由此积累了关于行星早期历史的大量数据，其中一些数据或许可以帮助我们弄清楚，这些黑暗致密的小天体到底是如何随着赋予它们光明和生命的恒星一起形成的。

现在天体物理学家或许得到了更多数据，但对于这个问题的准确答案，他们还是和以前一样摸不着头脑。事实上，系外行星的发现带来的问题比答案还多，许多系外行星的公转轨道迥异于太阳系内的行星，行星形成的故事离结束似乎还很遥远。如果非要简单总结一下的话，我们可以说，虽然我们还无法解释行星是如何从气体和尘埃中开始成形的，但要回答另一个问题却相对比较容易：行星开始成形以后，最初的小天体是如何在相对较短的时间内变得越来越大的。

行星成形的初始驱动来自何方，这的确是个棘手的问题。作为这个领域的世界级专家，普林斯顿大学的斯科特·特里梅因（Scott Tremaine）半开玩笑地提出了一套“特里梅因行星成形定律”。特里梅因的第一定律阐述如下：“关于系外行星的所有理论预测都是错的”，第二

定律则是：“关于行星成形最可靠的预测是它不可能发生”。特里梅因的玩笑凸显了一个绕不开的事实：行星的确存在，虽然我们完全无法解释这个天文之谜。

200多年前，为了解释太阳和太阳系的行星如何形成，伊曼努尔·康德提出了“星云假说”，根据他的理论，正在成形的恒星周围裹着一层旋转的气体和尘埃，后来这些物质逐渐凝聚成块，变成行星。宽泛地说，现代天文学行星形成理论的基础正是康德的假说，这套理论战胜了20世纪上半叶盛行一时的观点（太阳系的行星源自另一颗近距离掠过太阳的恒星），成了学界主流。按照后面这套理论设想的场景，在引力的撕扯下，两颗恒星都失去了一部分质量，这些气体离开恒星后有一部分冷却下来，凝聚形成行星。这套假说是英国著名天体物理学家詹姆斯·金斯（James Jeans）提出的，它的缺陷（或者说优点，具体取决于你个人的倾向）在于，如果这套假说成立，那么行星系应该非常罕见，因为在整个星系的生命周期中，两颗恒星近距离擦肩而过的机会可能只有寥寥几次。后来天文学家通过计算发现，被引力撕扯离开恒星的所有气体几乎都会蒸发，而不会凝聚，于是他们立即抛弃了金斯的假说，转而回头拥抱康德的理论。按照康德的设想，很多恒星都有自己的行星。

现在，天体物理学家有充分的证据证明，气体尘埃云里的恒星并不是一颗接一颗诞生的，而是千万颗恒星同时成形，一片尘埃云最终孕育的恒星可能多达100万颗。猎户座星云就是这样一个孕育恒星的巨大温床，它也是离太阳系最近的造星区域。在几百万年的时间里，这片区域将孕育数十万颗新恒星，这些星星会将星云中残存的大部分气体和尘埃吹向太空，所以几十万代之后的天文学家可能会观察到，这些年轻的恒星离开了孕育它们的茧壳，释放出灿烂的光芒。

现在的天体物理学家利用无线电望远镜来测绘年轻恒星周围的低温气体和尘埃。他们的观测结果表明，空间中运行的年轻恒星通常不是完全赤裸的，这些星体周围常常包裹着厚厚一层尺寸和太阳系相仿的旋转物质盘，这些物质的主要成分是氢（和其他丰度较低的气体），气团中散布着大量尘埃微粒。在这里，“尘埃”指的是数百万个原子组成的微粒簇，它们的尺寸比英文里的句号还要小得多。很多尘埃微粒的主要成分是碳原子，它们组合在一起形成了石墨（也就是铅笔里的“铅”）；其余成分包括硅和氧的原子混合物——从本质上说，这就是裹着细小石砾的冰晶。

恒星际空间中这些尘埃的形成也有一套复杂详细的理论，我们在此不加赘述，你只需要知道宇宙中充满尘埃就够了。尘埃形成的先决条件是数以百万计的原子富集在一起，考虑到恒星际空间中极低的物质密度，这样的过程最有可能发生在恒星大气层外温度相对较低的区域，因为恒星会将自身的材料温柔地吹向宇宙空间。

恒星际尘埃微粒的形成为行星的诞生奠定了至关重要的第一步。这样的描述不光适用于地球这样的固态行星，也同样适合气态巨行星，例如，太阳系里的木星和土星。虽然这些行星的主要成分是氢和氦，但天体物理学家根据它们的内部结构和质量计算得出结论：这些气态巨行星必然拥有固态的内核。比如说，木星的总质量是地球的318倍，其中木星核的质量相当于地球的几十倍。而土星的质量是地球的95倍，它的固态内核质量是地球的一二十倍。而对于太阳系内较小的气态行星天王星和海王星来说，它们的固态内核占比反而相对较高。这两颗行星的质量分别是地球的15倍和17倍，其行星核可能占据了总质量的一半以上。

对于这四颗气态行星，或许还有我们新近发现的所有气态行星来说，行星核在它们的形成过程中发挥着至关重要的作用：首先成形的必然是行星核，然后固态的行星核才开始吸引气体。因此，任何行星的形成都是从一大块固态物质开始的。在太阳系的所有行星中，木星的固态行星核尺寸最大，土星其次，然后是海王星和天王星，地球位列第五名，巧的是，地球的完整尺寸在太阳系中的排名也是第五。要解释行星形成的历史，我们必须回答一个基本问题：大自然是如何将尘埃凝聚成直径数千千米的物质团的？

这个问题的答案分成已知的和未知的两个部分，其中未知的那部分不出所料和起源问题有关。只要空间中已经形成了直径约800米的物体（天文学家称之为“微行星”），它就能产生足够强的引力，成功吸引周围的其他物质。多个微行星相互吸引构成行星核，最终形成成熟行星，短短几百万年内，小镇大小的物质团就会变成一个全新的世界，它的外面可能有一层薄薄的大气（例如金星、地球和火星），也可能裹着一层厚重的氢气和氦气（例如太阳系的4颗气态巨行星，这几颗行星与太阳之间的距离足够远，所以它们能聚集大量氢气和氦气）。天体物理学家借助一系列易于理解的计算机模型就能模拟从微行星到成熟行星的整个“发育”过程，包括种种细节，但根据现有模型，最终生成的内层行星总是尺寸较小的致密岩石行星，而外层行星则是稀薄的气态巨行星（当然，行星核并不是气态的）。在这个过程中，在其他更大天体的引力作用下，很多微行星会和它们形成的较大的天体一起彻底离开太阳系。

计算机程序可以完美地模拟从微行星到成熟行星的过程，但最初那个微行星又是怎么来的呢？最优秀的天体物理学家穷尽所有的物理学和计算机知识也无法构建出一个合理的模型。引力无法造就微行星，因为小物体之间微弱的引力无法有效地将它们凝聚在一起。尘埃形成微行星的理论假设倒是有两个，但都让人不甚满意。其中一个模型提出，微行星由尘埃微粒碰撞粘连堆积而成。从理论上说，这似乎站得住脚，因为大部分尘埃微粒一旦相遇的确会发生粘连。正是出于这个原因，你家沙发下面的灰尘总会聚集成团。稍微发挥一点想象力，你完全可以在脑子里模拟太阳周围的巨型尘埃团从椅子那么大慢慢长到房子那么大，然后是街区那么大，要不了多久它就会发展成微行星，到了这个阶段，引力就会真正开始发挥作用。

糟糕的是，微行星这么大的“尘埃团”需要的成形时间十分漫长。科学家检测了最古老的陨石中不稳定放射元素的原子核，结果发现，整个太阳系的形成花费的时间绝不超过几千万年，甚至可能比这还要短得多。太阳系内的行星差不多有45.5亿岁，所以行星成形花费的时间只有其总寿命的1%，甚至更少。但从尘埃到微行星的堆积过程需要耗费的时间比几千万年长得多，除非天体物理学家漏掉了这个过程中的某些关键因素，否则我们完全无法解释二者之间的巨大出入。

另一套假说则提出，可能有某种巨型旋涡将数万亿尘埃微粒卷到一起，在短时间内将它们挤成了一大块致密天体。形成太阳和行星的收缩气体和尘埃云显然都在旋转，所以这些巨大的气团很快就从椭圆形变成了盘状，正在形成的太阳位于盘状结构中央，它是一个密度相对较高的收缩球体，周围环绕着一层扁平的盘状物质。现在，太阳系的所有行星几乎都在同一个平面上按照同样的方向公转，这正是因为最初形成微行星和行星的物质都分布在扁平的盘状结构中。按照天体物理学家的设想，这个旋转的盘子里开始出现涟漪般的“不稳定”结构，密度较大和较小的区域交替排列。密度较大的区域会逐渐吸引结构内的气态材料和飘浮在气体中的尘埃，只需要几千年时间，这些不稳定结构就会变成旋转的巨大旋涡，它会将大量尘埃集中到相对较小的区域中。

微行星形成的旋涡模型看起来似乎很合理，但它还是无法彻底征服那些一心想弄清行星起源的人。经过仔细的检验，我们发现这套模型更符合木星核和土星核的情况，但不适合解释天王星和海王星的形成。“不稳定结构”的存在是旋涡模型成立的前提，但天文学家却无法证明这一点，而我们必须克制自己，不要盲目下结论。直到现在，太阳系内仍存在大量小行星和彗星，它们的尺寸和成分都类似原始的微行星，这或许可以证明，几十亿年前的原始行星的确是由数百万个微行星聚集形成的。因此，我们不妨把微行星的形成看作某种我们还不能完全理解的客观现象，它弥合了知识领域中的一个巨大缺口，让我们得以静下心来，欣赏微行星碰撞引发的一系列激动人心的后果。

在旋涡模型的框架下，我们很容易想象，太阳周围的气体和尘埃聚集形成几万亿个微行星，这些天体彼此碰撞，形成更大的物质团，最终创造出太阳系的4颗内侧行星和另外4颗气态巨行星的内核。别忘了还有围绕行星旋转的卫星。除了最内侧的水星和金星，太阳系的所有行星都拥有卫星。个头大的卫星直径长达几百到几千千米，这些天体看起来非常符合我们刚才提出的模型，因为它们也是由碰撞的微行星堆积形成的。卫星的个头达到我们如今看到的尺寸以后，堆积的脚步就会放慢许多，毫无疑问，这是因为（我们认为）到了这个阶段，大部分微行星都会被卫星附近的行星吸引过去，因为后者的引力更大。火星和木星轨道之间的数十万颗小行星或许正是这样形成的。最大的小行星直径长达几百千米，很可能来自微行星的碰撞；然而不远处的巨行星木星产生的引力干扰了小行星的进一步成长，阻止了它们继续长大。最小的小行星直

径不到1.6千米，我们或许可以将它当成微行星的典型样本。这些天体诞生于尘埃之中，却从未和其他微行星发生碰撞，这可能同样因为木星的引力干扰。

对于围绕巨行星运行的那些卫星来说，这套模型非常合理。太阳系的四颗巨行星都拥有一系列大小悬殊的卫星，其中最大的卫星个头堪比水星，而最小的卫星直径不到1.6千米，它可能也是一颗原始的微行星，因为从未发生碰撞所以一直没有长大。在这四颗行星拥有的所有卫星中，几乎所有大型卫星都在近乎同一个平面上沿相同方向公转。你很容易想到，太阳系内的所有行星也在同一个平面上沿相同方向绕太阳公转，二者之间的相似之处可以顺理成章地解释为：每颗行星周围都有一团旋转的气体尘埃云，物质块就诞生在这里。新生成的物质块不断变大，成为微行星，最终再形成卫星。

太阳系所有的内侧行星中，只有地球拥有体积较大的卫星。水星和金星没有卫星，火星的两颗卫星福波斯和得摩斯形状酷似土豆，直径只有若干千米，因此它们很可能代表着微行星刚刚开始碰撞形成天体的阶段。某些理论认为，这些卫星起源于小行星带，它们之所以会绕着火星公转，是因为火星的引力使得这两颗曾经的小行星脱离了自己的初始轨道。

我们的月亮直径超过了3000千米，在太阳系的所有卫星中，比月球尺寸更大的只有土卫六、木卫三、海卫一和木卫四（木卫一、木卫二的尺寸和月球大致相当）。月球会不会也是微行星碰撞的产物，就像太阳系的四颗内侧行星一样？

这个假设看起来颇有道理，但来自月球的岩石样本却讲述了另一个故事。30多年前的阿波罗任务从月球取回了一批岩石样本，我们分析了这些样本的化学成分，最终得出了两个结论，它们分别代表着月球两种可能的起源。一方面，月球岩石的成分与地球上的十分相似，所以这两颗天体不可能毫无关系，另一方面，月岩和地球岩石也存在微妙的区别，这足以证明组成月球的物质并非全部来自地球。既然月球并不是和地球全然无关，但也不是完全来自地球，那它到底是怎么形成的呢？

这个难题的答案乍看之下有些惊人，它基于一个曾经非常流行的假说：在太阳系早期的一次剧烈撞击中，太平洋海盆的一大块物质材料离开地球进入太空，最终形成了月球。学界目前的主流观点认为，月球的确来自某个巨型天体与地球的碰撞，但由于撞击地球的天体实在太大（尺寸和火星相仿），所以它的一部分材料自然而然地与地球上飞出的碎片融为了一体。被撞入太空的大部分材料很可能早已离开了地球轨道，但剩余的部分仍足以形成我们熟悉的月球，所以这颗卫星既拥有来自地球的材料，又蕴含一部分外来物质。这一切都发生在45亿年前，也就是行星最初开始成形的那1亿年里。

在那遥远的过去，如果真的有一颗火星大小的天体撞击过地球，那

它后来去哪儿了？它不太可能在冲击力作用下完全崩裂，变成我们观察不到的细小碎片：在内太阳系内，最先进的望远镜足以分辨微行星大小的物质块。为了寻找这颗远古天体的下落，我们看到了早期太阳系的另一副面貌：在那个混乱的年代里，太阳系内时时刻刻都在发生大量剧烈的碰撞。微行星能够堆积形成火星大小的天体，这样的天体却不一定能长期维持下去。它不光会撞击地球，碰撞后产生的大块碎片还将不断冲击地球和其他内侧行星，除此以外，这些碎片还会彼此碰撞，或者撞击月球（一旦月球开始成形）。换句话说，太阳系诞生之初的几亿年里，碰撞恐怖主义横扫内太阳系，巨型天体的碎片不断撞击正在成形的行星，最终这些碎片也变成了行星的一部分。撞击地球的巨型天体不过是这场炮弹雨中个头特别大的一个，在那个混乱暴力的灭世年代，无数微行星和更大的天体撞击地球及其相邻行星，最终和它们融为一体。

从另一个角度来说，这场险象环生的“炮弹雨”代表着行星形成过程的最后一个阶段。太阳系的雏形从那片混乱中脱颖而出，直到40亿年后的今天，它的模样仍未发生太大的改变：一颗普通恒星周围环绕着八颗行星（再加上冰冷的冥王星，它其实更像一颗巨大的彗星而非行星）、几十万颗小行星、几万亿颗流星体（每天撞击地球的这种小碎片多达几千块）和几万亿颗彗星——这些脏雪球诞生在比地日距离远十几倍的地方。别忘了，除了个别例外，长期来看，太阳系所有行星的卫星运行轨道都很稳定，从46亿年前它们诞生时起就几乎没有变过。我们不妨近距离观察一下那些围绕太阳公转的太空碎片，对地球这样的世界来说，小小的太空碎片既是生命的使者，又是死神的镰刀。

第十二章　行星之间

远远望去，我们的太阳系显得十分空旷。如果沿着海王星轨道画一个球，那么太阳和太阳系内所有行星及其卫星加起来的体积也只比球体总体积的万亿分之一多一点点。当然，这个描述隐含的前提是行星际空间真的空无一物。但要是近距离观察，我们会发现行星之间的太空中充满了各种各样的岩石、石砾、冰球、尘埃、带电粒子束和人造探测器。除此以外，行星际空间中还弥漫着强大的引力场和磁场，虽然你看不见这些力场，但它们仍会影响周围的物体。对于那些想在太阳系范围内旅行的人来说，这些小物体和力场带来的威胁的确不容忽视。最大的太空碎片甚至可能威胁地球上的生命，因为它们撞向地球的速度高达每秒几千米，而且这样的撞击不算罕见。

行星际空间并不空旷，以30千米/秒的速度绕太阳旋转的地球每天都会遭受数百吨太空碎片的洗礼，其中大部分碎片比沙子还小。几乎所有太空碎片都会在地球的上层大气中燃烧殆尽，它们携带大量能量闯入大气层，挡在它前面的任何粒子都会被蒸发。正是因为厚厚的“气毯”保护了大气层内的世界，人类这个脆弱的物种才有机会发展壮大。如果碎片的个头更大一点，比如说，和高尔夫球的尺寸差不多，那它会在摩擦中迅速升温，但碎片内部各处的温度并不均匀，所以在蒸发前它通常会崩裂形成大量小碎片。更大的碎片表面会被烧焦，但最终会坠落在地面上——至少有一部分会。你或许会认为，既然地球已经围绕太阳转了46万亿圈，那它应该已经“清空”了公转轨道上的所有碎片。事实并非如此，不过地球的努力颇有成效：以前的情况比现在还要糟得多。太阳和太阳系内的行星形成之后的第一个5亿年里，大量太空垃圾雨点般坠落到地球上，冲击带来的能量让地球大气层变得灼热滚烫，地面上更是干净得毫无生命迹象。

确切地说，某块太空垃圾扮演的角色十分关键：它的撞击促成了月球的诞生。科学家分析了阿波罗号带回地面的月球岩石样本，结果发现，月球上的铁和其他重元素都十分稀少，这意味着组成月球的很可能是地球上铁含量相对较低的地壳和地幔材料：一颗火星大小的原行星飞速掠过地球，将地面上的这些物质“舀”了出去。这次邂逅产生的一部分轨道飘浮物聚集起来，形成了我们可爱的低密度卫星。45亿年前，除了月球形成这一重大事件以外，初具雏形的地球、其他行星和太阳系内的其他大型天体都经历了太空碎片的“弹雨”洗礼。密集的撞击在天体表面留下了相似的损伤，直到今天，没有空气、未经侵蚀的月球和水星表面仍保留着这个时期留下的大部分陨石坑。

除了太阳系形成时残余的飘浮物以外，行星际空间中还飘浮着火星和月球（很可能也包括地球）被高能碎片撞击后产生的大大小小的石块。科学家利用计算机模拟了流星撞击地面的过程，结果发现，撞击点附近飞溅的石块完全有可能达到逃逸速度，一举摆脱地球引力的束缚。根据我们在地球上发现的火星陨石，科学家推算，每年都有大约1000吨火星岩石坠落到地球上。坠向地球的月球碎片可能也有这么多，所以要收集月岩样本，我们不必专程前往月球。几十块月球岩石早已抵达了地球，虽然这些样本并不是我们自己挑选的，而且在阿波罗计划那个年代，我们还不知道这件事。

如果火星上曾经存在生命——几十亿年前，液态水曾在火星表面自由流淌，那时候的火星可能存在生命——那么毫无疑问，藏在岩石角落和缝隙（尤其是裂缝）里的细菌完全有可能和陨石一起坠落到地球上。我们知道，某些种类的细菌能在冬眠状态下存活很长一段时间，前往地球的旅途中高剂量的太阳电离辐射也很难伤害它们。陨石在太空中传播细菌，这既不是疯狂的妄想也不是纯属虚构的科幻概念，而是完全有可能存在的客观事实，它甚至有一个响亮的名字：泛种论（panspermia）。如果火星真的先于地球孕育出了生命，如果简单的生命的确搭乘陨石从火星来到了地球，那么我们也许都是火星人的后代。如果事实果真如此，我们似乎就不必担心宇航员在火星上打喷嚏可能污染外星环境。不过，就算人类真的都是火星人，我们也很关注生命是如何从火星来到地球的，所以尽量减少人类活动对火星的污染依然十分重要。

太阳系内大部分小行星都分布在“小行星带”里，这个扁平区域位于火星和木星轨道之间。按照传统，小行星的发现者拥有该天体的命名权。艺术家笔下的小行星带往往是太阳系中飘浮着大量岩石的平面区域，不过，虽然小行星带的宽度绵延数百万千米，但这些天体的质量加起来也不超过月球质量的5%，而月球的质量只有地球的1%多一点点。乍看之下，小行星似乎微不足道，但事实上，对地球来说，这些小家伙宛如一柄始终悬在头顶的达摩克利斯之剑。不断积累的轨道扰动造就了一批“致命小行星”，它们的数量可能多达几千颗。这些小行星长椭圆形的轨道可能和地球轨道发生交叉，由此带来了碰撞的隐患。只需要粗略计算一下，你就会发现，未来几亿年里，公转轨道与地球轨道交叉的大部分小行星最终都会撞向地球，如果小行星的直径超过1.6千米，那么它携带的能量足以摧毁地球生态系统，毁灭陆地上的所有物种。这真是太糟糕了。

与此同时，小行星并不是唯一有可能威胁地球生命的太空物体。荷兰天文学家扬·奥尔特（Jan Oort）首次发现，冰冷的恒星际空间深处，来自太阳系形成早期阶段的大量冰冻残骸仍在围绕太阳公转，它们的轨道半径远大于任何行星。几万亿颗彗星组成的“奥尔特云”一直绵延到了太阳与最近一颗恒星的中点附近，这远远超出了太阳系本身的尺寸。

与奥尔特同时代的荷裔美籍天文学家杰拉德·柯伊伯（Gerard

Kuiper）提出，有一部分冰冷的彗星来自最初孕育行星的物质盘，如今这些彗星的轨道半径比海王星大得多，却比奥尔特云里的彗星小得多。天文学家将这类彗星所在的区域命名为“柯伊伯带”，这片孕育彗星的环状区域始于海王星轨道外侧，一直延伸到海日距离的几倍以外，冥王星就位于柯伊伯带内。柯伊伯带中最遥远的天体名叫“赛德娜”，这是一位因纽特女神的名字。它的直径相当于冥王星的2/3。由于附近没有大质量的行星干扰，柯伊伯带大部分彗星的轨道都能稳定地维持几十亿年。和小行星带的情况一样，柯伊伯带里也有一些彗星的公转轨道可能与其他行星发生交叉。比如，冥王星（我们可以把它看作一颗特别大的彗星）及其小兄弟（天文学家称之为“冥族小天体”）的公转轨道就和海王星的轨道发生了交叉。柯伊伯带的其他天体偶尔也会离开正常的远轨道，一头扎进内太阳系，和其他行星轨道发生交叉，哈雷彗星就是一个最著名的例子。

奥尔特云的彗星公转周期都很长，甚至远远超过人类寿命。和柯伊伯带的彗星不一样，奥尔特云彗星可能会从任何角度、任何方向大量进入内太阳系。过去30年里最明亮的彗星百武二号（1996）就来自奥尔特云，这颗彗星高悬在太阳系轨道平面上方，我们有生之年恐怕都看不到它重返地球。

如果我们的眼睛能看到磁场，木星看起来应该比天空中的满月还要大10倍。造访木星的飞船必须有能力抵抗强磁场的影响。1831年，英国化学家兼物理学家迈克尔·法拉第（Michael Faraday）发现，如果用一根电线切割磁场，电线两头就会产生电势差。因此，太空中高速运动的金属探测器内部可能产生感应电流，这些电流会和行星的磁场互动，从而干扰探测器的运动。这种效应或许可以解释两艘先驱者号飞船离开太阳系后速度为什么会莫名其妙地变慢。先驱者10号和先躯者11号都发射于20世纪70年代，目前它们在太空中飞行的距离比动态模型的预测结果短得多。科学家构建模型时已经考虑了飞船飞行路径上的太空尘埃和燃料箱泄漏的影响，所以要进一步解释先驱者号的神秘减速，太阳带来的磁场干扰或许是最值得分析的原因。

随着探测技术的进步，我们发现的天然卫星越来越多，再加上不断升空的行星探测器，统计卫星数目几乎变成了一个不可能的任务。这会儿，整个太阳系的卫星数量说不定就翻了一番。现在天文学家更感兴趣的是，这些卫星里到底哪颗更值得我们造访，或者更有研究价值。从某种角度来说，人类对卫星的兴趣远大于行星。比如说，火星的两颗卫星福波斯和得摩斯就曾出现在乔纳森·斯威夫特（Jonathan Swift）的经典作品《格列佛游记》（*1726*）里。当然，它们在小说里的名字和现在不一样，因为直到这部小说问世后100多年，人们才发现了这两颗卫星。斯威夫特当然不是先知，他只是觉得地球的卫星太少，木星的卫星（当时已知四颗）又太多，所以他给火星安排了一个介于二者之间的卫星数量。

月球的直径相当于太阳的1/400，但地月距离差不多也是地日距离

的1/400，所以对地球上的我们来说，天空中的太阳和月亮看起来大小差不多。这样的巧合在太阳系中独一无二，也正是出于这个原因，地球成了太阳系中唯一能拍摄到日全食照片的地方。地球还锁定了月球的旋转周期，所以这颗卫星的自转周期和它绕地球公转的周期完全相同。这是因为地球引力作用于月球内部密度较大的区域，使这一面始终朝向地球。木星的四颗大卫星和月球的情况完全一样，这些被锁定的卫星朝向母行星的始终是同一面。

木星的卫星系统让天文学家大跌眼镜。木卫一是离木星最近的大卫星，来自木星和其他大卫星的引力牢牢锁住了它的方向，由此产生的潮汐作用和内应力甚至熔化了木卫一（它的尺寸和我们的月亮差不多）表面的部分岩石，所以这颗卫星是太阳系内火山活动最活跃的天体。木星的第二大卫星木卫二蕴藏着丰富的水，同样在潮汐作用和内应力的影响下，木卫二内部的热量融化了地面冰层，所以这颗卫星封冻的冰盖下涌动着液态的海洋。

仔细审视天卫五（天王星的卫星之一）的地表照片，你会看到崎岖的皱褶和起伏，就像这颗可怜的卫星曾经被炸成碎片又胡乱拼起来了一样。天卫五的地貌为何如此奇特，这仍是一个未解之谜，不过这个谜题背后的原因可能非常简单，比如，它可能源自不均匀的冰盖上涌。

冥王星孤独的卫星卡戎[4]尺寸很大，而且它和冥王星的距离也很近，所以这两颗天体实际上处于互相锁定的状态——它们的自转周期都等于其绕共同质心公转的周期。太阳系内的行星以罗马神祇为名（比如，木星名叫“朱庇特”而非“宙斯”），为了方便起见，卫星的名字来自代表母行星的那位神祇生命中的重要角色，但角色的名字遵从希腊神话。由于这些经典神祇的社交生活相当复杂，所以我们完全不必担心名字不够用。

赫歇尔发现了一颗裸眼看不见的行星，当时他准备以一位国王的名字来命名它，希望能借此获得对方的支持。如果威廉爵士的计划成功了，那么现在太阳系里的行星名单应该是这样的：水星、金星、地球、火星、木星、土星、乔治。幸运的是，清醒的头脑最终占据了上风，所以几年后，这颗新行星还是获得了一位经典神祇的名字：乌拉瑞斯（天王星）。但赫歇尔用威廉·莎士比亚（William Shakespeare）剧作和亚历山大·蒲柏（Alexander Pope）长诗《夺发记》中的人物来命名天王星卫星的传统一直保留到了今天。所以在天王星的17颗卫星中，我们看到了阿里尔、科迪莉亚、苔丝狄蒙娜、朱丽叶、奥菲莉娅、波西亚、普克、昂布雷尔的名字，还有1997年才发现的两颗新卫星，它们分别叫作卡利班和希克拉库斯。

太阳表面每秒大约损失2亿吨物质（相当于亚马孙盆地的总流量），这些物质通过高能带电粒子组成的“太阳风”向外释放。以1609千

米/秒的速度穿过行星际空间的粒子束常常受到行星磁场的干扰，于是它打着旋儿奔向行星的南北磁极，继而与大气层中的气体分子发生碰撞，产生绚烂的极光。哈勃太空望远镜已经观察到了土星和木星极点附近的极光。而地球南北极不时亮起的极光就像是在提醒我们，拥有保护性的大气层是一件多么幸福的事情。

从理论上说，地球大气层延伸的范围远大于我们通常的认知。“近地轨道”上运行的卫星距离地面的高度为161～644千米，它们的公转周期约为90分钟。虽然在离地这么远的地方，人类根本无法呼吸，但这里的确存在少量大气分子，这些分子足以慢慢耗尽卫星的动能。为了抵抗这种阻力，卫星需要间歇点火才能停留在近地轨道上，而不是坠向地球，最终在大气层中烧毁。要定义地球大气层的边界，最合理的做法是寻找大气层分子密度等于行星际空间气体分子密度的界限。按照这个定义，地球大气层厚达几千千米。通信卫星的轨道高达37015千米（相当于地月距离的1/10），所以它能将新闻和视频传遍全球，完全不受大气层的影响。在这么高的轨道上，卫星不光摆脱了大气层的阻力，它们的公转周期也变成了24小时，因为它们离地球的距离更远，受到的引力也更小。既然这些卫星的公转周期等于地球的自转周期，所以它们看起来像是“悬停”在赤道上方的某个位置，所以这种卫星很适合充当地面信号的中继站。

根据牛顿引力定律，你和某颗行星的距离越远，它对你产生的引力就越小，但引力永远不会降低到零，而且只要物体的质量够大，那么哪怕隔着遥远的距离它也能产生强大的引力。因此，拥有强大引力场的木星阻挡了可能肆虐内太阳系的许多彗星。对地球来说，木星就像一面引力盾牌，正是由于木星的存在，地球才获得了相对较长（5000万～1亿年）的平静时光。如果没有木星的保护，地球上的复杂生命将面临更险恶的生存环境，它们随时可能因为一场毁灭性的撞击而彻底灭绝。

我们向太空发射的几乎每一枚探测器都利用了行星的引力场。比如说，2004年年底抵达土星的探测器卡西尼号发射于1997年10月15日，它一共利用了四次引力加速，其中两次来自金星，一次来自地球（返回飞越），还有一次来自木星。探测器利用引力弹弓从一颗行星飞往另一颗行星的操作十分常见，就像连续碰撞的桌球一样。如果不是这样的话，我们的小探测器根本无法获得足以抵达目的地的速度和能量。

现在，地球上的人需要对太阳系中的行星际碎片负责。2000年11月，戴维·莱维和卡洛琳·休梅克发现的一颗主带小行星1994KA被命名为“13123泰森”。这是一份有趣的荣誉，无须为此烦恼。正如我们之前说过的，很多小行星的名字都十分相似，比如，乔迪、哈里特、托马斯，顶着这几个名字的小行星简直数不胜数，除此以外，还有很多小行星被命名为梅林、詹姆斯·邦德，或者圣诞老人。目前我们已经测明轨道（天文学家基于轨道数据给小行星编号、命名）的小行星已经超过了20000颗，也许地球上的名字很快就不够用了。不过，无论名字够不够用，属于你的那块太空碎片其实并不孤独，广袤的行星际空间中还飘浮

着其他很多以现实或虚拟人物命名的碎片，想到这里，你总会觉得有些安慰。

在我们最后一次观测的时候，小行星“13123泰森”还没有一头撞向地球，所以它既不是灭绝生命的刽子手，也不是地球生命的源头。

第十三章　无数个世界：太阳系外的行星

上帝存在于无数个世界之中，

但我们只能在自己的世界里追寻他的影踪。

他的目光能穿透一切，

看见组成宇宙的一个又一个世界。

看星系如何形成，

观察别处的行星如何围绕别的太阳旋转，

每颗恒星如何哺育自己的子民，

或许这将告诉我们，

上帝为何将我们塑造成今天的模样。

——亚历山大·蒲柏，《人论》（*1755*）

近500年前，尼古拉·哥白尼（Nicolaus Copernicus）重新提起了古希腊天文学家阿里斯塔克斯（Aristarchus）首创的一套假说。哥白尼公然宣称，地球绝不是整个宇宙的中心，而只是围绕太阳旋转的一系列行星之中的一颗。

大部分人完全无法接受这一事实，他们从内心深处坚信，地球是绝对静止的中心，天空中的所有物体都围绕地球旋转，但长期以来，天文学家提供了大量富有说服力的证据，足以证明哥白尼所说的才是我们这个宇宙的真相。只要承认了地球只是太阳系内的行星之一，那么我们立即可以得出一个推论：宇宙中应该存在其他类似地球的行星，那些行星上可能也有居民，他们和我们一样工作、娱乐、做梦、制订计划、幻想未来。

几百年来，天文学家通过望远镜观察了成千上万颗恒星，却无法确定这些恒星是否拥有自己的行星。不过他们至少确定了一点：太阳的确是一颗颇具代表性的恒星，银河系里和太阳差不多的恒星数不胜数。既然太阳拥有一个行星系，那么其他恒星没道理都是孤家寡人，而且它们

的行星完全有可能孕育出各种各样的生命形式。1600年，焦尔达诺·布鲁诺（Giordano Bruno）正是因为公开表达这一观点而冒犯了教皇的权威，最终被烧死在火刑柱上。今天的游客可以穿过罗马鲜花广场露天咖啡馆拥挤的人群，走到广场中央，驻足瞻仰布鲁诺的雕像，思考思想的力量如何战胜那些企图压制它的势力。

布鲁诺的命运让我们看到，人类是多么热衷于想象其他世界的生命。若非如此，布鲁诺想必能够安然活到耄耋之年，NASA恐怕也不会陷入资金短缺的窘境。纵观历史，人类从未停止过想象其他世界的生命，直到今天，NASA仍在努力搜寻太阳系内的其他行星，希望发现生命的蛛丝马迹。不过，我们寻找地外生命的努力始终面临一个极大的障碍：太阳系的其他行星似乎都不太适合生命存活。

虽然再严苛的环境也不能完全抹杀生命存在的可能性，但我们对火星、金星、木星及其大型卫星的初步探查却没发现任何生命的迹象。更糟糕的是，我们发现了数不清的证据，足以证明这些星球的环境极端恶劣，完全不利于生命存活——至少不利于我们所知的生命存活。当然，要得出确切的结论，我们还需要做进一步的调查。幸运的是，这方面的工作正在进行中，尤其是寻找火星生命的工作。虽然目前看来，太阳系内存在地外生命的可能性十分小，但善于变通的人们早已将目光投向太阳系外的浩渺宇宙，在那个广阔的世界里，还有很多行星正围绕着别的恒星旋转。

1995年前，我们对系外行星的认知几乎完全出于想象。除了少数几颗围绕爆炸恒星残骸运行的尺寸和地球相仿的太空碎片（我们几乎可以肯定，这些碎片形成于超新星爆炸之后，所以很难被视作正常的行星）以外，天体物理学家连一颗“系外行星”（围绕除太阳以外的其他恒星旋转的行星）都没发现。不过到了1995年年底，人类终于发现了第一颗系外行星，几个月后又找到了4颗，接下来，我们发现系外行星的速度越来越快，如同开闸后的洪水般势不可当。时至今日，系外行星数量已经远远超过了太阳系内的行星——目前，已经有4000多颗系外行星得到证认，而且可以肯定，未来几年内这个数字还将不断增长。

要描述这些新发现的世界，进而分析地外生命存在的可能性，首先我们必须面对一个难以置信的事实：尽管天体物理学家坚称他们不光知道这些行星的存在，还能推算它们的质量、与母恒星的距离、公转周期甚至公转轨道的形状，但从来没有任何一个人真正看到过地外行星的模样，也没有人拍到过它们的照片。

既然天体物理学家连见都没见过系外行星，他们又怎么知道它的那么多数据？对于那些研究星光的人来说，这个问题很好回答。观察星光的专家可以将星光分解成光谱，然后比较成千上万颗恒星的光谱，根据不同颜色的相对强度分辨各种类型的恒星。很久很久以前，这些天体物

理学家只能通过照片研究恒星光谱。时至今日，他们的设备已经换成了能够精确记录各种颜色星光强度的高精确度数字仪器。虽然这些恒星远在数万亿千米之外，但天体物理学家对它们的基本特性了如指掌。只需要测量星光光谱，如今的天体物理学家就能轻松确定哪些恒星的性质最接近太阳，哪些恒星比太阳更热、更亮，又有哪些恒星比太阳更冷、更暗。

而且他们能做的还不止这些。熟悉了各种恒星光谱中的颜色分布规律以后，天体物理学家就能从常规光谱中快速辨认出一些熟悉的模式，比如说，某种颜色的光比平时少了一些，甚至完全消失了。他们常常在星光中发现这样的模式，除此以外，他们还会发现某颗恒星的整个光谱朝红端或者蓝端偏移了一点，因此他们常用的指标也得做出相应的调整。

科学家用波长来定义颜色，波长测量的是振动光波连续两个波峰之间的距离。事实上，特定波长的光对应的就是眼睛看到（大脑感知到）的颜色，只不过这种描述方式更精确一点。如果天体物理学家在数千种颜色组成的光谱中发现了某种熟悉的模式，比如说，某些光线的波长比平时长了1%，那么他们会立即得出结论：恒星颜色之所以会发生变化，是因为受到了多普勒效应的影响，这种效应描述的是正在接近或远离我们的物体发生的波长（频率）变化。举个例子，如果某件物体正在靠近我们，或者我们正在靠近它，那么我们探测到的这件物体发出的所有光波都比静止时短；如果这件物体正在离我们远去，或者我们正在离它远去，那我们观察到的波长会比静止时长。运动光源相对于静止状态的波长（频率）变化幅度取决于它和观察者之间的相对运动速度。如果运动速度远小于光速，那么光波波长变化的百分比（我们称之为“多普勒效应”）等于光源与观察者的相对速度与光速之比。

20世纪90年代，为了更精确地测量星光的多普勒频移，美国和瑞士的两个科学家团队做出了大量努力。他们这样做，不仅是为了满足科学家对精准的不懈追求，更重要的是，他们有一个明确的目标：通过研究恒星的星光确认行星是否存在。

我们为什么要用这么迂回的方法来寻找系外行星？因为截至目前，要找到太阳系外的行星，这是唯一的办法。以太阳系为例，我们不难发现，相对于恒星之间的漫长距离而言，恒星与围绕它旋转的行星之间的距离短得可以忽略不计。最近的恒星与我们之间的距离相当于太阳与其最内侧行星——水星——距离的50万倍。就连冥王星到太阳的距离也只相当于太阳到半人马座阿尔法星（它是离我们最近的恒星）距离的1/5000。从天文学的角度来说，恒星与行星之间的距离实在太短，而且行星都很暗，它们只能反射恒星的光芒，所以我们几乎不可能真正“看见”太阳系外的任何一颗行星。举个例子，假设围绕半人马座阿尔法星旋转的某颗行星上有一位天体物理学家，他将望远镜对准太阳的方向，试图寻找太阳系内最大的行星——木星。考虑到太阳与木星间的距离相当于太阳与半人马座阿尔法星距离的1/50000，而木星的亮度只有太阳的

十亿分之一，对这位天体物理学家来说，在太阳旁边寻找木星的难度不亚于迎着探照灯的光芒寻找一只萤火虫。未来某天，我们或许能解决这个难题，但以目前的技术水平而言，直接观测系外行星完全是个不可能的任务。[5]

多普勒效应为我们提供了一条捷径。通过对恒星的深入研究，我们可以仔细测量星光的每一丝变化，这意味着该恒星接近或远离我们的速度发生了改变。如果这样的变化是周期性的——速度差先逐渐变大，达到一个最大值，然后减小到一个最小值，接下来再次增长到同一个最大值，以相同的时间间隔如此不断循环——那么我们就能得出一个合理的推论：这颗恒星必然围绕着空间中的某点旋转。

主宰恒星舞步的力量来自何方？根据我们现有的知识，唯一的答案是引力。毫无疑问，按照行星的定义，它的质量远小于恒星，所以它产生的引力也很小。因此，当行星的引力作用于质量远大于它的恒星，恒星的速度只会发生很小的变化。比如说，木星造成的太阳速度变化值大约是12.2米/秒，比一位世界级的短跑运动员快一点点。木星以12年为周期围绕太阳公转，如果观测者正好位于公转轨道的同一个平面上，那么他应该能测出阳光在木星影响下产生的多普勒频移。在一段特定的时间里，太阳相对于这位观察者的速度每秒会增加12.2米；等到6年以后，这位观察者又会发现，太阳的速度比平常慢了12.2米/秒。在整个循环周期内，太阳与观察者之间的相对速度会从极大值平稳过渡到极小值，然后再从极小值增长到极大值。经过数十年的观察，这位天体物理学家顺理成章地得出结论：太阳拥有一颗公转周期为12年的行星，它让太阳的运转轨道和运动速度发生了细微的变化。太阳轨道与木星轨道半径之比相当于二者质量的反比。太阳的质量是木星的1000倍，所以木星围绕二者共同质心旋转的轨道半径是太阳轨道半径的1000倍，挪动太阳比挪动木星难1000倍。

当然，太阳拥有好几颗行星，每颗行星的引力都会对太阳产生一定的影响。因此，太阳最终的运动轨迹由所有行星共同确定，而每颗行星的公转周期各不相同。作为太阳系内最大、最重的行星，木星作用于太阳的引力也最强，所以在这套复杂系统中，主宰太阳舞步的力量主要来自木星。

天体物理学家通过观察恒星的舞步寻找系外行星，他们知道，如果那颗系外行星的质量或者公转半径和我们的木星差不多，那么要找到它的踪迹，我们测量速度差的精确度至少要达到12.2米/秒。以地球标准而言，这个速度似乎不算慢，但放到天文尺度上看，这个值相当于光速的百万分之一，要知道，恒星与我们的相对速度通常是这个数的几千倍。因此，要测出百万分之一光速的速度差引起的多普勒频移，天体物理学家测量波长（对应星光颜色）的精确度也必须达到百万分之一。

精确测量星光的意义不仅仅在于寻找行星。首先，通过这样的观测，天文学家确定了恒星速度的变化周期，这实际上等同于相应行星的

公转周期。既然恒星的舞步按照特定周期不断循环，那么隶属于它的行星必然遵循同样的公转周期，只不过后者的轨道半径比前者大得多。于是我们顺理成章地算出了行星与恒星之间的距离。牛顿早已证明，绕恒星公转的天体与恒星的距离越近，它的轨道周期就越短，反之则越长，所以根据行星的公转轨道周期，我们可以轻松算出它与恒星之间的平均距离。比如说，如果太阳系内某颗行星的公转周期是1年，那么它与太阳之间的距离必然等于地日距离，而12年的公转周期对应的轨道半径是地日距离的5.2倍，木星就在这条轨道上运动。所以，采用这种观测方法的研究团队不仅可以对外宣布他们发现了一颗行星，还能算出这颗行星的公转周期及其与恒星之间的平均距离。

除此以外，他们还能进一步推测这颗行星其他信息。既然行星与恒星之间的距离是一个确定的值，那么行星作用于恒星的引力直接取决于它自身的质量。越重的行星产生的引力越大，影响恒星舞步的能力也越强。经过多年的仔细观察与推演，科学家制定了一份行星特征表格，只要知道了行星与恒星之间的距离，研究团队就能根据这份表格推测行星的质量。

不过，通过恒星的舞步来确定行星的质量，这种办法也有局限。研究天空中舞动的恒星时，天文学家无从得知我们与行星轨道平面之间的位置关系，也许我们正好位于这颗行星的轨道平面上，或者正好垂直于轨道平面（在这种情况下，我们测得的恒星速度差应该是零），又或者（最常见的情况）我们的位置与轨道平面既不平行也不垂直，而是成一个夹角。在行星的引力作用下，行星与恒星的轨道平面完全重合。因此，要测得恒星轨道速度的完整值，我们观测恒星的视线必须落在这个轨道平面上。要进一步理解这一点，你不妨设想自己站在棒球场上，如果投手掷出的棒球正迎面向你飞来或者飞速离你而去，那么你当然可以测量它的飞行速度，但要是棒球从你的视野中横掠而过，那就完全是另一回事了。如果你是一名球探，那么你最好去本垒后面找个位置坐下，因为在这个方向上，你的视线正好迎着棒球的飞行方向。要是你站在一垒线或者三垒线旁边，那么投手掷出的球就会从你眼前横着掠过去，棒球在你视线方向上的速度分量约等于零。

多普勒效应体现的只是恒星接近或远离我们的速度，无法测量垂直于视线方向的速度分量，所以一般来说，我们无从得知自己观测恒星的视线与恒星轨道平面之间的夹角到底有多大。这意味着我们算出的系外行星质量只是一个下限，要让它等于实际值，除非我们能证明自己的视线正好落在恒星的轨道平面上。平均而言，系外行星的质量是这个下限的两倍，但我们无从得知哪些系外行星更重一点，哪些又更轻一点。

除了推算行星的公转周期、轨道半径和质量下限以外，利用多普勒效应研究恒星舞步的天体物理学家还完成了另一个任务：他们确定了行星公转轨道的形状。有的系外行星公转轨道近乎正圆形，就像太阳系里的金星和海王星一样，但也有一些系外行星轨道呈明显的长椭圆形，类似水星、火星和冥王星，这样的行星近日点和远日点相距遥远。由于行

星离恒星越近，它的运转速度就越快，所以在这段时间里，恒星自身的速度也会发生较大的改变。如果天文学家观测到某颗恒星在整个周期中的速度差始终保持恒定，那么引发这种变化的行星必然绕着一条近乎圆形的轨道运动。反过来说，如果恒星速度差时大时小，那么对应的行星轨道一定不是正圆形的，通过测量恒星速度差在整个周期中的变化，天文学家可以确定行星轨道的扁度。

研究系外行星的天体物理学家仔细观察天空中的星光，然后根据观测到的数据进行合理的推测，最终他们可以确定任何一颗系外行星的4个关键参数：轨道周期、与恒星的平均距离、质量下限以及轨道扁度。他们捕捉来自数万亿千米外的星光，以1%的精确度测量星光的颜色，试图利用这种方法在天空中寻找地球的堂亲——虽然他们尚未达成目标，但也获得了不小的成就。

不过还有一个问题。我们发现的很多系外行星公转轨道半径都比太阳系的行星小得多。考虑到目前已知的所有系外行星的质量都和木星（这颗气态巨行星的轨道半径相当于地日距离的5倍以上）差不多，这个问题就显得更严重了。我们不妨花点时间审视一下这桩怪事，再来看看天体物理学家的解释。

利用恒星舞步寻找系外行星的时候，我们必须记住，这种方法存在天然的偏差。首先，离恒星较近的行星公转周期必然比远处的行星短。由于天体物理学家观察宇宙的时间十分有限，所以他们率先发现的肯定是那些公转周期更短（比如6个月）的行星，而不是远处的大周期（比如12年）行星。无论行星的公转周期是长还是短，天体物理学家都至少需要观察几个周期，才能确定恒星的运行速度的确存在一个可重复的变化模式。因此，要寻找那些公转周期与木星相当（12年）的行星，他们可能得花上大半辈子。

其次，近处的行星作用于母恒星的引力也强于远处的兄弟姊妹。更强的引力造成的速度变化更大，恒星光谱产生的多普勒频移更明显，探测起来也更方便，所以那些近距离内层行星更容易引起我们的注意。不过，无论这些系外行星与恒星的距离是远还是近，我们利用多普勒频移算出的行星质量都和木星差不多（相当于地球质量的318倍）。质量远小于这个值的行星对恒星速度的影响太小，我们现在的技术根本探测不到。

基于上述原因，我们发现的第一批系外行星与恒星的距离都很近，质量也都和木星差不多，这件事也不足为奇了。真正让人惊讶的是，这些系外行星与恒星的距离实在近得离谱——我们熟悉的系内行星围绕太阳公转的周期通常是几个月到几年，但系外行星的公转周期常常只有短短几天。截至目前，天体物理学家已经发现了十多颗公转周期小于一周的行星，其中最快的一颗行星公转周期只有两天半多一点。这颗名叫HD73256 b的行星围绕一颗类似太阳的恒星旋转，它的质量至少相当于木星质量的1.9倍，公转轨道呈长椭圆形，平均轨道半径只有地日距离的

3.7%。换句话说，这颗巨行星的质量是地球的600倍以上，但它的轨道半径还不到水星的1/10。

水星由岩石和金属组成，这颗行星朝向太阳的那面温度高达几百摄氏度。与此相对，木星和太阳系的其他巨行星（土星、天王星和海王星）都是巨型“气球”，这几颗行星的固态内核在总质量中的占比极小。按照现有的任何一种行星构造理论，质量与木星相当的行星都不可能是水星、金星和地球这样的固态行星，因为构成行星雏形的原始云团包含的物质太少，不足以固化形成质量相当于地球几十倍的行星。在这个伟大的侦探故事中，只需要再向前迈出一步，我们就会得出结论：迄今为止，天文学家发现的所有系外行星（它们的质量与木星相当）必然都是气态巨行星。

这个令人震惊的结论立即带来了两个问题：这些类似木星的行星为什么会在这么近的轨道上运行？它们的气体为什么没被恒星的热量蒸发？第二个问题的答案相对简单：这些行星的质量很大，所以哪怕在高温环境中，它自身的引力也足以克服气体原子和分子向外逃逸的趋势。不过，在最极端的条件下，虽然引力占据了上风，但这样的优势非常微弱，只要行星轨道再向内收缩一点，它们的气体就真的会被恒星的热量蒸发。

要回答第一个问题，我们必须厘清行星形成的基本逻辑。正如我们在第十一章中看到的，为了理解太阳系的行星形成过程，理论家付出了极大的努力。他们认为，系内行星诞生于一片煎饼状的气体尘埃云里，小物质块慢慢堆积形成更大的物质块，这就是行星的雏形。在这个围绕太阳旋转的扁平物质团里，独立的物质块先是随机出现，新形成的物质团密度高于平均值，所以接下来它们开始吸引其他微粒。在这个过程的最终阶段，地球和其他固态行星都经受了最后一批大物质块的密集撞击洗礼。

随着行星系逐渐凝聚成形，太阳开始释放光芒，蒸发周围最轻的元素（氢和氦），所以太阳系最内侧的4颗行星（水星、金星、地球和火星）几乎完全由更重的元素组成，包括碳、氧、硅、铝和铁。与此相对，在地日距离5～30倍的这个区域里，物质块的温度相对较低，大部分氢元素和氦元素得以保留下来。这两种最轻的元素也是丰度最高的元素，所以4颗气态巨行星的质量都比地球大得多。

冥王星与岩石质的内层行星和气态的外层行星都不一样，它其实更像彗星。冥王星由岩石和冰组成，目前还没有任何一艘飞船造访过这颗天体。[6]彗星的直径通常只有8～80千米，但冥王星直径长达3219千米，它算是早期太阳系里名列前茅的庞然大物。冥王星的寿命和最古老的陨石相仿，陨石是掉落到地面上的太空岩石、金属碎片或者岩石与金属的混合物，有经验的人能分辨花园里的普通石块和陨石。

所以行星的雏形很可能就是类似彗星和陨石的结构，气态巨行星利

用固态内核吸引大量气体，维持自身形态。利用放射性测年法，科学家发现，最古老的陨石已经有45.5亿年历史，比月球（42亿年）和地球（40亿年出头）上最古老的岩石还要老得多。因此，太阳系大约诞生于45.5亿年前，在那个遥远的创世年代，太阳系的行星自然而然地分成了两组：相对较小的固态内层行星和个头和质量都大得多的气态巨行星。4颗内层行星与太阳之间的距离相当于地日距离的0.37～1.52倍。与此同时，4颗巨行星与太阳之间的距离要远得多，相当于地日距离的5.2～30倍，所以它们才能长到那么大。

回顾太阳系行星的形成过程，再看看我们现在发现的系外行星，目前的局面着实令人尴尬：为什么有这么多质量与木星相当的天体运行在半径比水星还要小得多的轨道上？的确，我们发现的第一批系外行星与恒星之间的距离都近得离谱，太阳系倒更像是个例外。要知道，理论家以太阳系为蓝本建立行星系标准模型的时候，他们根本不知道其他行星系到底长什么样。不过，近处的行星的确更容易被发现，理解了这一偏见以后，科学家恢复了一点信心。没过多久他们就开始有意识地拉长观察周期，采用高精确度测量设备，试图寻找与恒星距离更远的气态巨行星。

时至今日，如果把我们发现的系外行星按照轨道半径从小到大的顺序排列起来，这份名单的最上方仍然是我们之前提到过的那颗公转周期只有两天半的行星，接下来我们跳过中间的上百个条目，直接去看最后一名：这颗行星围绕“巨蟹座55”恒星旋转，它的质量至少是木星的4倍，公转周期长达13.7年。根据这颗行星的轨道周期，天体物理学家计算得出，它与恒星的距离相当于地日距离的5.9倍，或者木日距离的1.14倍。这是我们发现的第一颗轨道半径超过木日距离的系外行星，它所在的行星系看起来似乎和我们的太阳系差不多，至少二者的恒星和最大的行星都十分相似。

但事实并非如此。这颗围绕巨蟹座55旋转、轨道半径相当于5.9倍地日距离的行星其实并不是那个行星系的第一颗行星，而是第三颗行星。现在，天文学家已经积累了足够的数据，解释多普勒频移的技艺也越来越高超，所以他们可以根据恒星的舞步反推出两颗甚至更多行星的影响。每颗行星都会对恒星施加一定程度的影响，其循环周期等于行星围绕恒星公转的周期。只要观察的时间够长，计算机的功能够强大，行星猎手就能透过恒星的复杂舞步看到背后那一个个独立的世界。比如，巨蟹座55是一颗中等亮度的恒星，天体物理学家已经发现，它拥有两颗距离较近的行星，其公转周期分别是42天和89天，质量下限分别相当于木星的0.84倍和0.21倍，其中质量“只有”木星0.21倍（相当于67个地球）的那颗行星是当时人类探测到的最轻的系外行星。不过时至今日，系外行星的质量下限已经降低到了地球质量的35倍——还是比地球大得多。所以我们不必着急，未来很长一段时间里，天文学家恐怕都很难找到真正和地球条件相仿的系外行星。

围绕巨蟹座55运行的这颗行星的确引人注目，即便如此，我们也不

能忘了刚才的问题：为什么有这么多质量与木星相仿的系外行星运行在半径远小于水星的轨道上？专家会告诉你，如果某颗恒星的条件与太阳相仿，那么在它周围3～4倍地日距离的范围内，根本不可能形成木星那么大的行星。假如系外行星也满足这一点，那么它们必然是在成熟以后才移动到离恒星更近的轨道上的。若事实果真如此，那我们要面对3个棘手的问题：

（1）什么力量将成形后的行星推到了离恒星更近的轨道上？

（2）为什么这些行星不会继续靠近恒星，直至最后烧毁？

（3）为什么那么多行星系里都发生了这样的事情，但我们的太阳系却没有？

在系外行星发现浪潮的刺激下，渊博的科学家找到了这些问题的答案。目前最受学界认可的专业意见可以总结如下：

第一，行星之所以会发生迁移，是因为气态巨行星形成以后，海量的剩余物质仍在它的轨道内侧围绕恒星旋转。大型行星的引力会将这些物质逐渐转移到外层轨道上，与此同时，受反作用力的影响，行星自身会慢慢朝着内层轨道运动。

第二，等到这些行星移动到比初始位置近得多的轨道上，来自恒星的潮汐力就会锁定它们的位置。太阳和月球的潮汐力会掀起地球上的潮水，恒星的潮汐力也会改变系外行星的自转周期，使其等于公转周期，就像地球和月球的情况一样。除此以外，潮汐力还会阻止行星继续靠近恒星，不过这种现象背后的天文学原理过于复杂，我们在此不加赘述。

第三，行星系内的碎片是多还是少可能完全取决于运气。有的行星系就是残留了大量碎片，最终导致行星迁移，就像我们观察到的那些系外行星，而有的行星系碎片相对较少，所以行星都停留在自己的初始位置上，例如我们的太阳系。对于巨蟹座55来说，也许它的三颗行星都向内发生过明显的迁移，最外侧的行星与恒星的初始距离其实是现在的好几倍，又或者这个行星系内碎片的分布情况比较特殊，最终前两颗行星向内发生了明显的迁移，但第三颗行星一直停留在自己的初始轨道上。

要解释恒星周围行星系成形的具体过程，天体物理学家还有很多工作要做。与此同时，系外行星猎人还在孜孜不倦地寻找地球的堂亲，它的尺寸、质量与轨道半径应该都和地球相仿。如果真的找到了这样一颗行星，他们希望能对它进行精确的测量，以确定这颗行星是否拥有类似的球的大气层和海洋，甚至拥有生命——哪怕隔着几十光年的距离。

天体物理学家深知，要实现这个梦想，他们必须将设备送到大气层外的地球轨道上，这样才能避开干扰，得到更精确的测量数据。NASA的开普勒计划就是这样一项实验，它的目标是观察我们周围的数十万颗恒星，捕捉地球尺寸的行星掠过恒星表面时引发的星光微妙变化（大约万分之一）。这种测量方法对角度的要求极为苛刻，我们的视线必须和被观察行星的轨道平面几乎完全平行。不过，在这种情况下，行星引发恒星星光变化的周期等于行星的公转周期，有了这个数据，我们就能算出行星与恒星之间的距离，进而根据星光的变化规律确定行星尺寸。

不过，要想获得行星本身的更多物理参数，我们必须直接研究行星的照片，分析行星的反射光谱。NASA和ESA（欧洲空间局，简称“欧空局”）正在执行这方面的计划，希望在未来20年内实现这一目标。如果我们真的能找到一颗类似的球的系外行星，哪怕在另一颗比太阳亮得多的恒星旁边，它只是一个微不足道的暗淡蓝点，这也足以激励下一代的诗人、物理学家和政治家。我们可以分析这颗行星的反射光，确定它的大气层中是否含有氧气（生命存在的迹象之一），甚至确定那里是否同时含有氧气和甲烷（生命大概率存在的证据），这样的壮举足以让区区凡人飞升成为吟游诗人代代传唱的英雄。正如F.斯科特·菲茨杰拉德（F. Scott Fitzgerald）在《了不起的盖茨比》中所说的，我们即将面对的是与人类创造奇迹的能力同样伟大的一些东西。本书的最后几章介绍的正是这方面的内容，如果你梦想在宇宙中的其他地方发现生命，那就请继续读下去吧。

卷五

生命的起源

第十四章　宇宙中的生命

追寻起源的征途不出所料地将我们引向了一个最根本也最具争议性的最大谜团：生命的起源，尤其是未来某天可能与我们建立联系的地外生命的起源。数百年来，人类从未停止过猜测，我们和宇宙中的其他智慧生命将如何邂逅，如何做出一些必将载入史册的哪怕是最简单的交流。要解开这个谜题，最关键的线索或许就藏在宇宙的起源蓝图之中，它囊括了地球的起源、太阳系行星家族的起源、为生命提供能量的恒星的起源、宇宙中结构的起源，还有宇宙本身的起源和演化。

如果我们能够仔细审视这张蓝图，它将引领我们走遍整个宇宙，从最宏观的天文现象到最微不足道的细微波澜，从浩瀚无垠的空间到各种生命滋生演化的一个个具体地点。如果我们能将不同环境孕育出的不同生命形式放到一起比较，那么我们或许可以从中总结出生命诞生的规律，包括一般情况和特例。今天的我们知道的生命形式只有一种，那就是地球上的生命。地球上的所有生命拥有同样的起源，而且它们都基于DNA分子完成繁殖。这一事实局限了我们对生命的认识：既然我们只见过这一种生命形式，那要普查整个宇宙的所有生命，我们又该从何处入手？除非未来某天，我们在地球以外的地方发现了其他形式的生命，由此扩展了对生命的认识，这样的普查才有可能完成。

事情还可能发展得更糟。我们对地球生命的演化史的确已经有了一定的了解，而且从中归纳出了一些普遍规律，按照我们的设想，这些规律应该适用于宇宙中的所有生命。所以我们可以根据这些规律在宇宙中寻找满足（或者曾经满足）生命基本需求的环境。无论我们如何努力去想象地球以外的生命，最终都难免落入这种以人类为中心的思维窠臼，我们天生倾向于相信，地外生命形式必然类似我们自己。地球生命的演化史和个人的亲身体验局限了我们的视野，实际上我们根本无从想象生活在其他世界中的截然不同的生命形式。只有熟知地球生命多样性的生物学家才能自信地推测地外生命可能的模样，它们的奇怪程度完全超出了普通人类想象的极限。

也许未来某天——或许是明年，或许是下个世纪，或许是更久之后——我们会发现地球以外的生命，或者收集到足够多的数据，证明如今某些科学家提出的观点：地球上的生命是银河系中独一无二的特殊现象。但是现在，我们拥有的信息实在太少，所以一切皆有可能：也许我们会在太阳系内的某几颗天体上发现生命，这意味着银河系内拥有生命的行星系可能有几十亿个；也许我们最终确定，地球是太阳系内唯一拥有生命的天体，至于围绕其他恒星旋转的行星上有没有生命，这个问题

只能留给时间来回答；又或者我们慢慢发现，无论望向多远的地方，我们都看不到生命的任何迹象。寻找地外生命的过程和其他任何努力一样，正面的结果总能助长积极的情绪，而不利的消息常常造成意志的消沉。关于地外生命是否存在的问题，最新的进展应该算是正面的。我们发现太阳附近的很多恒星都拥有自己的行星，所以在我们的银河系里，生命或许并不鲜见。无论如何，要准确回答这个问题，我们还有很多工作要做。如果我们最终发现，虽然行星的数量众多，但它们都无法提供适合生命存活的条件，那么地球或许真的是宇宙中唯一有生命的地方。

谈到地外生命，科学家常常援引美国天文学家弗兰克·德雷克（Frank Drake）在20世纪60年代初提出的德雷克方程。这个方程提供了一个颇为灵活的概念，而不是言之凿凿地宣称物理宇宙一定如何运转。我们一直试图估算银河系中可能存在智慧生命的星球数量，德雷克将已知和未知的信息有效地综合起来，把这个问题转化成了一系列量化参数的组合，每个参数分别代表智慧生命发展所需的一个必要条件。这些参数包括：（1）银河系中寿命长得足以让围绕它旋转的行星发展出生命的恒星数量；（2）每颗恒星平均拥有的行星数量；（3）客观条件适合生命存活的行星在所有行星中的占比；（4）宜居行星真正发展出生命的概率；（5）宜居行星的生命演化出文明的概率，按照天文学家的定义，“文明”至少应该具备和我们交流的能力。将这5个参数相乘，我们就能算出银河系中至少出现过文明的行星数量。而要算出最后的答案——在任意给定的时间段内（譬如现在），银河系中存在的文明数量——我们必须将刚才的计算结果再乘以第六个也是最后一个参数：文明的平均寿命与银河系总寿命（约100亿年）的比值。

要确定德雷克方程中各个参数的具体数值，我们必须综合运用天文学、生物学和社会学等各方面的知识。目前我们已经比较准确地估算出了前两个参数的值，第三个参数也有了一些眉目。从另一个方面来说，要估算第四个参数和第五个参数，我们必须先找到银河系内的其他生命形式，并对它们进行深入的研究。但现在我们完全没有这方面的数据，所以专家也只能和门外汉一样瞎蒙。比如说，如果一颗行星具备维持生命的基本条件，那么它真正孕育出生命的概率有多大呢？要回答这个问题，最科学的方法应该是在几十亿年的时间内持续观察多颗宜居行星，看看其中有多少行星能孕育出生命。同样，要估算银河系中文明的平均寿命，首先我们得有足够多的文明样本，然后还得连续观察几十亿年。

既然如此，这岂非不可能完成的任务？未来很长一段时间里，我们恐怕都无法算出德雷克方程的精确解，除非我们邂逅的某个地外文明早已解决了这个难题，没准我们的文明就是他们采集的数据样本之一。但无论如何，德雷克方程提供了一个行之有效的思路，让我们能以科学的方法估算目前银河系中可能存在的文明数量。方程中的6个参数都将直接影响计算结果，所以我们必须将这些参数连乘，才能得出最后的结论。举个例子，你原本假设每三颗宜居行星中有一颗能够真正发展出生

命，但后来却发现这个比例实际上应该是1/30，那么就算你的其他参数都正确无误，但最后你算出的文明数量也是实际值的10倍。

目前我们能够相对比较准确地估算德雷克方程的前三个参数，根据这些数据进行的初步计算表明，银河系中可能存在生命的行星多达数十亿颗。（谨慎起见，我们将寻找地外生命的范围局限在银河系以内，因为其他星系的文明恐怕很难和我们建立联系。）如果你愿意的话，你可以和朋友、家人、同事认真讨论一下德雷克方程后面三个参数的值，算出你心目中银河系拥有的技术文明数量。比如说，如果你相信大部分宜居行星都能发展出生命，而且这些生命基本都能演化出文明，那么你可以得出结论：银河系中曾经发展出文明的行星多达数十亿颗。反过来说，如果你觉得宜居行星孕育生命的概率只有几千分之一，而这些生命发展出文明的概率也不高于千分之一，那么根据你的设想，银河系中拥有过文明的行星就只有几千颗，而不是几十亿颗。不同的人算出的答案可能相差好几个数量级，我们举的这两个例子还不算极端。这是否意味着德雷克方程根本就不是什么科学，而是天马行空的妄想？事实并非如此。之所以会出现这样的局面，只是因为我们手里的数据太少，而这个问题又太复杂。

估算德雷克方程后三个参数的困难之处在于，以点代面难免失之偏颇——我们现在甚至连点都没有。比如说，我们连自己的文明能延续多久都不知道，又该怎么去估算银河系内文明的平均寿命呢？既然如此，我们是否应该彻底放弃估算这些数字呢？但这样一来，我们就只能停留在无知的迷雾中，也无从享受推测的乐趣。既然现在我们完全没有这方面的数据，那么在做推测的时候，我们最好保守一点：最安全的策略应该是假设我们在银河系中并不特殊（虽然这一点也可能错得离谱）。天体物理学家以哥白尼之名将这样的策略命名为“哥白尼原则”，16世纪中期，正是这位科学家将太阳放到了我们这个行星系的中央，后来人们发现，事实的确如此。虽然早在公元前3世纪，希腊哲学家阿里斯塔克斯就提出过日心说，但直到哥白尼的年代，大部分人仍然相信地球才是宇宙的中心。在罗马天主教会的支持下，亚里士多德和托勒密建立的地心说大行其道，地球是所有造物的中心，大多数欧洲人对此深信不疑。从神创论的角度来说，地心说俨然已是先验的真理。直到今天，仍有不少人坚信地球是宇宙的中心，因为他们感觉不到地球的运动，而且天空中的所有星星看起来的确都在围绕地球旋转。

虽然谁也无法确保哥白尼原则就一定适用于所有科学领域，但它的确有效平衡了我们总是觉得自己比较特殊的思维定式。更重要的是，截至目前，哥白尼原则成功帮助我们解决了许多难题，几乎从无败绩：地球并不是太阳系的中心，太阳系也不是银河系的中心，银河系更不是宇宙中心。如果你相信边缘才是最特殊的位置，那我们也不在任何结构的边缘。因此，最明智的做法应该是假设地球上的生命也同样遵循哥白尼原则。如果事实果真如此，地球生命的起源、组成和结构又将为我们寻找宇宙中的其他生命提供什么线索呢？

要回答这个问题，我们必须深入理解一系列生物学知识。长期的观察帮助我们积累了许多生物学数据，地球生命的多样性常常令我们惊叹不已，生物学家对此感触最多。仅仅在地球这一颗行星上就有无数种生命形式，其中包括真菌、甲虫、海绵、水母、蛇、秃鹫和巨杉。如果将这七种生物按照体形从小到大的顺序排列起来，你很难相信它们来自同一个宇宙，更别说同一个星球。如果一个人从来没见过蛇，你该如何向他描述这种生物？“你一定得相信我，我刚才在地球上看到了这样一种生物，它会用红外探测器跟踪猎物，哪怕猎物比它的头大5倍，它也能将对方活生生地吞下去，它没有手臂也没有腿，确切地说，没有任何附肢，但它能在水平地面上快速游动，和你走路一样快！”

和多姿多彩的地球比，好莱坞编剧对地外生命的幻想简直贫瘠得令人汗颜。当然，编剧或许可以责怪公众的庸俗口味，大家就爱看似曾相识的外星侵略者和怪物，而不是完全陌生的地外生命。除了《幽浮魔点》（*1958*）和斯坦利·库布里克（Stanley Kubrick）作品《2001：太空漫游》（*1968*）里那几个出色的地外生命形象以外，好莱坞塑造的外星人看起来总是和人类差不多。无论这些外星人长得有多丑（或者多可爱），他们几乎都拥有两只眼睛、一个鼻子、一个嘴巴、两个耳朵、一个头、一个脖子、一副肩膀、手臂、双手、手指、躯干、双腿、双脚，而且他们都会走路。从解剖学的角度来看，这些生物本质上和人类并无区别，虽然从理论上说，他们应该生活在其他行星上，演化路径也完全不同于地球生命。这简直是对哥白尼原则最粗暴的践踏。

研究地外生命可能形式的太空生物学是科学界推测色彩最浓郁的学科，但太空生物学家可以颇为自信地说，地外生命（无论是智慧生命还是非智慧生命）看起来至少应该和地球上的某些生命一样奇特，甚至更加奇特。寻找地外生命的时候，我们必须努力摆脱好莱坞深植于大众头脑中的偏见。要做到这一点并不容易，却非常重要，如果你真的想从科学的角度计算地外生命存在的可能性，而不是单纯从感情上期盼未来某天在宇宙中邂逅能与我们平静交谈的智慧生命。

第十五章　地球生命起源

要在宇宙中寻找生命，首先我们必须回答一个基本问题：什么是生命？太空生物学家会诚实地告诉你，这个问题其实并没有简单、权威的答案。“看到你就知道了”，这样的说法也没什么意义。无论采用什么标准来区分地球上的生命和非生命，你总能找到一些不符合定义的特例。某些（或者说全部）生命会生长、活动、衰败，但很多看起来一点也不像生命的物体也会表现出类似的行为。生命会繁殖？火也会。生命会演化产生新的形式？水溶液里的某些晶体也会。对于自然界的某些造物来说，只要一看到它，你就会不假思索地将它归类为生命——谁会怀疑三文鱼或者鹰不是生命呢？但如果你对地球生命的多样性有所了解，那么你不得不承认，对于很多生物来说，你得拥有专业的知识，而且足够幸运，才能发现它们的确是活的。

由于篇幅有限，我们只能给生命下一个粗略而实用的定义：能够繁殖、演化的物体都可归类为生命。如果某类物体仅仅拥有繁殖能力，我们还不能说它是活的。随着时间的推移，它们必须演化出新的形式，我们才能称之为生命。根据这个定义，如果被研究的物体只有一个，那么我们无从判断它到底是不是生命；我们必须查验同类物体的一系列个体，跟踪观察它们随时间流逝产生的变化，才能得出最后的结论。这样定义生命可能过于苛刻，但它至少很适合我们目前的情况。

通过观察地球上各式各样的生命，生物学家总结出了地球生命的一个共性。他们发现，地球上的所有生物主要都由四种化学元素组成：氢、氧、碳和氮。在任何一种生物的个体体内，其他所有元素加起来所占的比例也不到1%。除了四大元素以外，生物体内还有少量的磷，对大多数生物来说，这也是一种至关重要的关键元素。另外，还有更少量的硫、钠、镁、氯、钾、钙和铁。

但我们是否可以就此认为，宇宙中的其他生命形式也具有同样的特性？这时候就该祭出哥白尼原则了。地球生命体内含量最高的这四种元素在整个宇宙中的丰度都能排进前六名之列，由于位居前六的另外两种元素——氦和氖——几乎不与其他任何元素发生反应，所以我们可以说，地球生命由宇宙中最丰富、化学性质最活跃的元素组成。人类对其他世界的生命做出了五花八门的预测，其中最可靠的一条或许是：组成地外生命的基本元素应该和地球上的差不多。如果地球生命的主要成分是四种非常罕见的元素，例如，铌、铋、镓和钚，那么我们有充分的理由怀疑，地球生命在宇宙中必然有其特殊之处。但事实上，地球生命的化学成分非常合理，所以我们乐观地认为，宇宙中的其他某些地方很可

能也存在别的生命。

地球生命的成分与哥白尼原则的契合之处还不止这一点。如果我们生活的行星主要由氢、氧、碳和氮组成，那么生命的主要成分也是这四种元素就完全是件顺理成章的事情，但事实上，地球的主要成分是氧、铁、硅和镁，而且最外层的地壳主要由氧、硅、铝和铁组成，对比一下组成生命的四大基本元素，我们发现这两组元素的交集只有一个：氧。我们将目光投向几乎完全由氢和氧组成的海洋，惊讶地发现，（除了氢和氧以外）海水中最常见的元素是氯、钠、硫、钙和钾，生命的另外两大基本元素碳和氮都不在此列。所以总的来说，地球生命的化学成分更类似恒星，而不是地球本身。生命的化学成分比地球本身更符合宇宙中的一般情况——对于执着于追寻地外生命的人来说，这是个良好的开端。

初步建立了“宇宙中组成生命的原材料并不鲜见”的观念以后，接下来你或许会问：如果有合适的环境和能源（比如附近有一颗恒星），这些原材料组合形成生命的概率有多高呢？等到未来某天，人类对太阳系内可能存在生命的天体进行详尽的调查以后，我们或许可以比较准确地回答这个问题。不过现在，既然手头没有这方面的数据，我们只能通过其他迂回的方式找出一个近似的答案，然后继续追问：地球上的生命是怎么诞生的？

地球生命的起源仍是一个谜团。我们之所以对生命的起源所知甚少，很大程度上是因为这些事发生在几十亿年前，存留至今的线索几近于无。地球历史上40亿年之前的化石记录和地质记录完全是一片空白，但大多数古生物学家（研究远古生命的专家）相信，地球生命诞生于46亿年前到40亿年前，也就是太阳和它的行星诞生之初的这前6亿年里。

我们之所以缺乏40亿年前的地质数据，是因为地壳运动抹除了当时的记录，这样的运动通常被称为“大陆漂移说”，但更科学的叫法应该是“板块构造论”。来自地球内部的热能推动地壳板块不断滑动、碰撞、彼此重叠。板块的构造运动将曾经存在于地面上的所有东西缓慢地埋进地底。所以我们很难找到寿命超过20亿年的岩石，就连最古老的岩石也只有38亿岁。基于这一点，你很容易就能得出一个合理的推测：最原始的生命不太可能留下化石证据，我们几乎不可能在地球上找到最初一二十亿年的生命留下的可靠记录。目前我们发现的地球生命最古老的确切证据“只能”追溯到27亿年前，但有间接证据表明，在此之前，生命至少已经存在了10亿年。

大多数古生物学家相信，地球生命的历史至少有30亿年，甚至可能超过40亿年。也就是说，在地球形成之后的前6亿年里，生命已经开始出现。这个结论基于一个原始生命体的合理假设。近30亿年前，大量氧气开始出现在地球的大气层内。我们之所以知道这件事，线索完全来自

地质记录而非化石证据：氧气会加剧富铁岩石的锈蚀，制造出漂亮的红色石头，亚利桑那州的大峡谷就是个典型的例子。来自前富氧时代的岩石绝不会是这种颜色，也不会留下其他与富氧大气有关的任何线索。

大气的富氧化是地球经历过的最严重的污染。除了加速铁的氧化以外，氧气还会和其他很多简单分子结合，严重破坏原始生命的食物来源。所以，大量氧气出现在地球的大气层中，这意味着生命要么适应这一变化，要么去死。如果直到这时候，地球上的生命还没有出现的话，它以后也永远不会出现了，因为此后诞生的原始生命都将面临饿死的危险，富氧环境会让它们的食物氧化变质。很多生物通过演化适应了氧气带来的污染，如今呼吸氧气的动物都能证明这一点。除此以外，你也可以选择尽量避开氧气。直到今天，所有动物（包括我们自己）的胃里还栖居着数十亿微生物，它们在胃部的酸性环境中活得很好，但只要暴露在空气中就会死亡。

地球大气层中（相对）丰富的氧气来自何方？这些氧气主要来自漂浮在海面上的微生物，它们的光合作用会释放氧气。还有一小部分氧气的生成与生命全然无关，因为阳光中的紫外线会分解海面上的部分水分子，将氢原子和氧原子释放到空气中。如果某颗行星地表有大量的水，那么在光线的照射下，行星大气层中的氧含量必将缓慢上升，只是这个过程可能需要几亿年甚至几十亿年。大气中的氧气也可能阻碍生命的出现，因为这种活泼元素会氧化一切能维持生命的营养物质。氧气会扼杀生命！这个论断听起来违反常识，但放到宇宙的尺度上却很准确：生命只能诞生于行星历史的早期阶段，否则大气层中越来越多的氧气将彻底扼杀生命出现的可能性。

出于某种奇怪的巧合，地球历史中缺乏地质记录的那个时期不仅仅是生命的起源年代，同时也是所谓的“大轰炸”时期。地球诞生之初的这几亿年的确意义重大，在这几亿年里，地球表面的每一寸土地都承受着太空碎片的持续轰击，亚利桑那州巴林杰陨石坑这种规模的撞击每个世纪都会发生好几次，每隔几千年，还有更大的碎片（直径长达几千米）坠落到地球上。每次剧烈撞击都会彻底重塑冲击点周围的地形，所以经历了数十万次撞击之后，整个地球表面早已面目全非。

这些撞击又将如何影响生命的起源呢？生物学家告诉我们，地球生命的出现和灭绝都和陨石有关，这样的事情可能发生过很多次。大轰炸阶段坠落到地球上的碎片主要来自彗星，从本质上说，这种天体其实就是夹杂着小石砾和灰尘的大雪球。彗星的“雪”里既有水凝成的冰也有二氧化碳凝成的干冰；除了雪、沙砾、富含矿物质和金属的岩石以外，最初几亿年里密集撞击地球的彗星碎片里还包含着各种各样的小分子，例如，甲烷、氨、甲醇、氰化氢和甲醛。这些分子再加上水、一氧化碳和二氧化碳，它们共同为生命提供了原材料。这几种分子都由氢、碳、氮和氧组成，而且它们都是构建复杂分子的基础结构。

因此，彗星的撞击为地球提供了海洋里的一部分水和生命起源的原材料。甚至生命本身也可能随着彗星来到了地球上，不过也有人提出，彗星的温度实在太低（通常是零下几百华氏度），很难孕育出真正复杂的分子。虽然我们无法确定是否真有生命搭乘彗星来到了地球，但可以肯定的是，在那个大轰炸年代，彗星在地球上散播生命之种的同时也可能毁灭已经出现的生命。最原始的生命形式可能反复在地球上诞生过很多次，每次它们都能存活、繁衍几十万年甚至几百万年，直到一块特别大的太空碎片撞向地球，抹除所有生命。过了一段时间以后，生命又会再次诞生，再次灭亡，如此周而复始，不断循环。

我们之所以能肯定，地球生命经历过不止一次诞生和灭亡，主要是因为两个事实。首先，地球生命诞生的时间很早，绝对不超过地球寿命的前1/3。既然10亿年的时间足以孕育出生命，那么生命起源实际需要的时间说不定比这还要短得多，可能不超过几百万年，或者不超过几千万年。其次，我们知道，大型太空碎片的撞击摧毁地球上的大部分生命，这样的浩劫每隔几千万年就会发生一次，其中最著名的白垩纪——第三纪大灭绝发生在6500万年前，除了鸟类祖先以外的所有恐龙都死于非命，和它们一起走向灭绝的还有其他无数物种。但在地球历史上，白垩纪——第三纪大灭绝并不是最可怕的浩劫，发生在2.52亿年前的二叠纪——三叠纪大灭绝摧毁了地球上近90%的海洋物种和70%的陆地脊椎动物，地面上几乎只有真菌幸存了下来。

白垩纪——第三纪大灭绝和二叠纪——三叠纪大灭绝的源头都是某颗直径长达两三千米的巨型太空碎片。地质学家已经在尤卡坦半岛北部及其附近的海床上找到了6500万年前的一个巨型陨石坑，正好对应白垩纪——第三纪大灭绝发生的年代。澳大利亚西北海岸外有一个二叠纪——三叠纪大灭绝年代留下的更大的陨石坑，但引发那次灭绝的可能不仅仅是陨石撞击，还有其他一些因素，譬如火山爆发。其实白垩纪——第三纪恐龙灭绝这一个例子就足以提醒我们，彗星或小行星的撞击将对生命造成多大的破坏。而大轰炸年代的地球必然经历过不止一次这样的撞击，冲向地球的太空碎片直径可能长达80千米、160千米，甚至402千米。这样的撞击必然会清空地球上的生命，它们要么彻底灭绝，要么只有一小部分存活下来；这样的巨型太空碎片造访地球的概率肯定比现在直径16千米的天体冲向地球的概率还高。现有的天文学、生物学、化学和地质学知识告诉我们，早期地球具备制造生命的必要条件，但外部的宇宙环境随时可能抹除刚刚萌芽的生命。在任何一颗恒星及其行星形成之初，造星过程残余的碎片都将密集撞击刚刚成形的星球，甚至可能抹除这些行星上的所有生命。

40多亿年前，太阳系形成过程中残余下来的大部分碎片要么已经撞向了行星，要么进入了公转轨道，不再横冲直撞。因此，地球周围的宇宙环境逐渐平静下来，我们迎来了如今的安乐时光。在这个阶段，可能每隔几百万年才会有一颗大得足以威胁全球生命的天体撞向地球。抬头看看天空中的圆月，你就能体会到，从那遥远的过去到现在，陨石撞击带来的威胁已经减少了几个数量级。月亮上那张“人脸”实际上是广阔的

熔岩平原，它来自40亿年前大轰炸时代末期的一次剧烈撞击。这座直径长达88.5千米的环形山名叫“第谷坑”，造就这个巨坑的天体撞击月球的时间比地球上的恐龙灭绝略晚一点，虽然它的撞击力度略逊于地球上的那一次，但也足够引人注目。

地球上的生命是否早在40亿年前就已诞生，而且有一部分生命熬过了大轰炸时期的密集撞击？又或者在大轰炸时代结束后的静谧期，生命才开始萌芽？这个问题我们现在还无法回答。除此以外还有一种可能：地外天体为我们的星球带来了生命的种子，或许是在大轰炸期间，或许是在那之后不久。如果在那个天外火雨不断的年代，生命的确曾经反复出现、灭绝，那么我们或许可以合理地期待，宇宙中与地球相似的其他行星上，同样的过程也可能反复发生。但从另一个方面来说，如果地球上的生命只出现过一次，无论是土生土长还是来自地球以外，那么这个过程可能完全出于幸运。

无论地球上的生命只诞生过一次还是很多次，我们都无法回答一个关键问题：生命到底是怎么形成的？长久以来，人们提出过许多天马行空的猜测。要是谁能解开这个谜题，他必将获得丰厚的回报。从亚当的肋骨到弗兰肯斯坦博士创造的怪物，人们总是倾向于认为，某种神秘的“生命冲力”将鲜活的气息赋予了无生命的物质。

科学家试图深入探查，通过实验和化石记录研究生命与非生命之间的藩篱到底是什么，大自然又是如何打破这一藩篱的。早期人们认为，生命起源于池塘或潮池中的简单分子，它们会相互作用，创造出更复杂的分子。1859年，查尔斯·达尔文（Charles Darwin）的惊世之作《物种起源》出版，在这本书中，达尔文提出，曾经出现在地球上的所有生命可能全都源自某种原始的生命形式。两年后，他在给朋友约瑟夫·胡克（Joseph Hooker）的一封信中写道：

人们常说，创造生命的所有条件现在我们一个都不缺，甚至从来就没缺过。但是（噢，这真是个沉重的但是）我们完全可以设想某个温暖的小池塘里什么都有（包括氨、磷盐、光、热、电，等等），蛋白质分子已经成形，并为下一步更复杂的变化做好了准备，如果这一切发生在今时今日，这些物质很快就会被“吃掉”，所以现在的情况和前生命时代很不一样。

换句话说，生命的起源需要两个条件：第一，新陈代谢所需的基本化合物必须大量存在，甚至有所冗余；第二，以这些化合物为食的造物还没有出现（其实还有第三个条件：大气层中的氧气相对比较稀薄，所以它们不会与这些简单化合物结合，破坏原始生命的口粮，我们之前讨论过这一点）。

从科学的角度来说，最成功的实验莫过于现实中的演化。1953年，为了验证达尔文“生命起源于池塘或潮池之中”的观点，斯坦利·米勒（Stanley Miller）做了一个著名的实验：他在实验室中重现了早期地球的水池环境，当然，具体的条件主要出自他的设想，而且经过了高度简化。当时米勒还是芝加哥大学的一名研究生，他的老师是诺贝尔奖得主哈罗德·尤里（Harold Urey）。米勒和尤里将水装入烧瓶，然后在水面上方灌注水蒸气、氢气、氨和甲烷组成的混合气体；接下来他们从下方加热烧瓶，迫使烧瓶内的部分物质蒸发，再通过一根玻璃管将混合蒸汽导入另一个烧瓶；在第二个烧瓶中，他们用电火花模拟闪电的效果，最后再将混合蒸汽重新导入第一个烧瓶，完成一次循环。这个过程循环重复了几天，而不是现实中的几千年。没过多久，米勒和尤里就发现，烧瓶底部的水中充满了“有机黏性物质”，这是多种复杂分子组成的混合物，其中包括各种各样的糖和两种最简单的氨基酸（丙氨酸和鸟嘌呤）。

蛋白质分子本质上是20种氨基酸排列组合形成的不同结构，所以米勒-尤里实验揭示了一个惊人的结果：最简单的分子在极短的时间内就能生成氨基酸分子，而后者是构建所有生命体的基本单元。除了氨基酸以外，这个实验还制造出了另一些相当复杂的分子，人们称之为核苷酸，它是组成DNA（携带生物遗传信息的巨型分子）的关键结构元素。不过，要在实验室里真正制造出生命，我们还有很长的路要走。就算我们能人工制造出全部20种氨基酸，从氨基酸到生命仍有一条鸿沟。科学家在一些保存得最完好的古老陨石中发现了氨基酸分子，人们相信，这些陨石诞生于太阳系生命的早期，也就是说，它们的寿命长达46亿年，而且这些石头自形成以来几乎一直保持原状。所以，我们或许可以得出结论：制造氨基酸的自然过程在各种条件下都有可能发生。但从另一个方面来说，我们通过实验得出的结果也没什么奇怪的：生物体内的简单分子在多种条件下都能快速形成，但生命本身却不行。最关键的问题依然悬而未决：哪怕一切条件都已准备就绪，一系列的分子到底如何演变成生命？

早期地球孕育生命的时间绝不是短短几周，而是几百万年甚至几千万年，因此米勒和尤里的实验结果似乎足以支持生命起源的潮池模型。但时至今日，大部分试图追寻生命起源的科学家认为，当时的技术水平极大地限制了米勒和尤里的实验。他们之所以改变态度，倒不是对实验结果有所怀疑，而是因为他们认识到，这个实验背后的基本假说可能存在天然的缺陷。要理解这个缺陷，我们必须先看看现代生物学如何描述最古老的生命形式。

演化生物学的基础是各种生物DNA和RNA分子的相同和不同之处，这些分子携带的信息控制着生物的生理机能和繁殖过程。通过研究这些巨型复杂分子，生物学家描绘了一幅生命的“演化树”，你可以通过这棵大树直观地看到不同形式的生命在演化中的“距离”，两个物种演化距离

的远近完全取决于它们的DNA和RNA分子有多大区别。

生物学家曾经将“界”定义为生物分类法中层级最高的类别，现在他们发现，生命之树有三个主要的分支（三个“域”）：古菌、细菌和真核生物。真核生物包括所有拥有清晰细胞核的独立细胞，细胞核内的遗传物质主导着细胞的繁殖。正是因为真核生物拥有这样的特性，所以它比另外两个域的生命体更复杂，事实上，普通人熟悉的所有生命几乎都属于这个分支。因此，我们或许可以顺理成章地得出结论：真核生物出现的时间应该比古菌和细菌更晚。又因为细菌的出现远远晚于古菌的出现（原因十分简单：细菌的DNA和RNA更复杂），所以我们几乎可以肯定，正如它们的名字所暗示的那样，古菌代表着最古老的生命形式。接下来我们要说的可能会吓你一跳：不同于细菌和真核生物，古菌主要由“极端微生物”组成，它们喜欢极端的环境——接近或超过沸点的水、强酸，或者普通生命根本无法存活的其他环境（当然，如果这些极端微生物拥有自己的生物学家，它们会觉得自己才是“正常”生物，而在室温下繁荣滋长的其他生命体才是“极端生物”）。对生命之树最新的研究表明，生命是从极端微生物开始的，后来它们才演化成了能在所谓的“正常”条件下获益的生命形式。

既然如此，达尔文的“温暖小池塘”和米勒-尤里在实验室里制造的潮池自然不是极端生物的理想栖息地。干燥与湿润交替循环的温和周期无从谈起，生命的起点很可能藏在喷涌的热泉附近，滚烫的泉水可能含酸。

在过去几十年里，海洋学家真的找到了这样的地方，而且发现了生活在那里的奇怪生命。1977年，两位海洋学家乘坐一艘深海潜水器找到了第一处深海热泉，它藏在加拉帕戈斯群岛附近的太平洋海底，离平静的海面足有2.4千米。热泉附近的地壳就像厨房里的高压锅，将极高的压强锁在“锅盖”里，所以“锅子”里的水被加热到了100摄氏度以上，却不会沸腾。接下来，锅盖突然开一条缝，高压过热泉水立即从地壳下方喷涌到冰冷的海床上。

深海热泉喷出的过热泉水中溶解的矿物质会迅速冷却凝结，在喷孔周围形成多孔的巨型岩石“烟囱”，这些烟囱的内部滚烫，外层与海水接触的地方却很凉。温差悬殊的环境中生活着无数从未见过阳光的生命，它们不需要太阳的热量，却需要海水中溶解的氧，追根溯源，这些氧也来自海面附近能够进行光合作用的生物。生活在极端环境中的这些虫子靠地热为生，而地热有一部分来自地球形成过程的余温，还有一部分则来自不稳定同位素（例如，半衰期为几百万年的铝-26和半衰期长达十数亿年的钾-40）持续衰变产生的辐射能。

海洋学家在阳光根本无法抵达的深海热泉附近发现了和成人身高一样长的巨型管虫，除此以外还有大群细菌和其他小型生物。就像植物从阳光中汲取能量完成光合作用一样，深海热泉附近的生物靠“化学合成作用”制造能量，这些能量归根结底来自地热。

化学合成到底是怎么发生的呢？深海热泉喷出的热水中富含硫-氢化合物和铁-氢化合物。喷口附近的细菌会将这两种化合物与水分子中的氢原子和氧原子结合起来，再加上海水中溶解的二氧化碳提供的碳分子和氧分子，制造出更大的碳水化合物分子。这样看来，深海细菌的行为和它地面上的表亲十分相似，后者也会利用碳、氧和氢制造碳水化合物。有的微生物会从阳光中汲取能量，制造碳水化合物，而有的微生物制造碳水化合物的能量来自海床上的化学反应。深海热泉附近的其他生物以这些细菌制造的碳水化合物为食，就像地面上的植食动物和肉食动物一样。

不过，深海热泉附近的化学反应制造出来的产品不仅仅是碳水化合物分子。要知道，碳水化合物里没有铁原子和硫原子，这些多余的原子会形成另一些化合物，其中最引人注目的是硫化铁晶体，俗称“傻子金”，古希腊人称之为“火石”，因为用它使劲撞击其他石头就会产生火花。作为地球上储量最丰富的含硫矿石，硫化铁可能在生命起源的过程中扮演着重要的角色，因为它促成了碳水化合物分子的形成。这套假说是由德国专利律师兼业余生物学家根特·维奇特萧瑟（Günter Wächtershäuser）提出的，繁重的工作并未磨灭他对生物学的兴趣，正如专利审查员的本职工作也不能阻止爱因斯坦研究物理学。（爱因斯坦拥有物理学的高级学位，但维奇特萧瑟的生物学和化学知识完全是自学的。）

1994年，维奇特萧瑟提出，地球诞生之初，从深海热泉中喷涌而出的铁和硫自然生成的硫化铁晶体可能为富含碳的分子提供易于富集的表面，来自附近喷口的碳分子很容易在这里堆积起来。和池塘（或潮池）起源假说一样，维奇特萧瑟也无法清晰描述基本的分子如何形成生物，但他坚信深海的高温环境对生命起源做出了不可替代的贡献，或许我们最终会发现，他的思路没错。维奇特萧瑟认为，最早的复杂生命分子正是在高度有序的硫化铁晶体表面形成的，面对科学会议上的批评者，他发出了掷地有声的宣言：“有人说生命的起源是从无序中产生秩序，但我要说的是，秩序来自秩序本身！”这句德国色彩浓郁的口号赢得了不少拥护，但只有时间才能最终证明真理。

所以，生命起源的基本模型有这么多种，到底哪种才是对的呢？地球生命到底是源自海边的潮池，还是海床上的过热喷泉呢？目前看来，这两种假说的胜算基本五五开。研究生命起源的专家还不能完全接受“生命诞生于高温环境中”的说法，因为目前我们判断不同物种在演化树上位置的方法仍有争议。另外，我们通过计算机程序追溯古老RNA分子（DNA的近亲，它在演化中出现的时间显然早于DNA）中不同种类的化合物，结果发现，偏爱高温的化合物出现的时候，生命已经走过了一段温度相对较低的时期。

因此，哪怕是目前最前沿的研究也无法确切回答生命起源的问题，这样的情况在科学领域其实相当常见。虽然我们可以推算出地球生命诞生的大致时间，却无从得知这一伟大事件发生的地点和具体的过程。最

近，古生物学家给地球生命神秘的祖先起了个名字：LUCA，这个英文缩写的意思是“所有地球生命最后一个共同的祖先”（瞧瞧科学家脑子里地球本位的思想是多么根深蒂固，这个缩写中的U代表的是“宇宙”，如果非要较真的话，既然是地球生命共同的祖先，它的英文缩写应该是LECA，因为E才是“地球”的缩写）。目前，给这些祖先（拥有相同基因的一系列原始生物）起名字主要是为了提醒我们自己，要真正解开生命起源之谜，我们还有很长的路要走。

我们想弄清自己来自何方，这绝不仅仅是为了满足天然的好奇心。无论是在地球上还是在宇宙中的其他地方，起源不同的生命诞生、演化和生存的路径各不相同。比如说，地球的海床或许提供了这颗星球上最稳定的生态环境。哪怕有一颗巨型小行星撞击地球，抹除了地面上的所有生命，海底的极端微生物也很可能完全不受影响，继续快快乐乐地生活下去。甚至存在这样的可能性：每次大灭绝之后，海底微生物都会慢慢演化出新的生命形式，重新填满地面上的空间。就算太阳突然消失，地球开始在宇宙中流浪，这样的变化恐怕也很难登上极端微生物的报纸头条，因为它几乎不会影响深海热泉附近的生活。不过，在未来50亿年内，太阳将变成一颗红巨星，它的体积也将飞速膨胀，填满整个内太阳系。与此同时，地球的海洋将彻底蒸发，就连地球本身也会蒸发一部分。一旦事情发展到这个地步，地球上的任何生命恐怕都无法置身事外。

既然地球上的极端微生物如此常见，我们不禁要问：太阳系形成期间，那些未能进入稳定公转轨道、最终离开了太阳系的行星和微行星深处是否也可能隐藏着生命？这些天体的“地”热能足以维持几十亿年。推而广之，其他太阳系形成过程中也有数不清的行星被推出了恒星的引力范围，它们是否也携带生命？也许恒星际空间中充满生命，它们的诞生和演化过程都发生在那些没有恒星的流浪行星深处。认识到极端微生物的重要性之前，天体物理学家曾经认为每颗恒星周围都有一个“宜居带”，在这个范围内，行星上的水或者其他物质才能维持液态，分子才能漂浮其中，彼此接触，制造出更复杂的分子。但时至今日，我们必须修正这样的观念，除了恒星周围正好能接受适量星光的整齐区域以外，生命可能栖居在宇宙中的任何地方，它们维持活力依靠的可能不是星光带来的能量，而是附近的放射性岩石产生的热能。所以，三只小熊的农舍或许并不是童话故事里唯一的舒适家园。所有人，甚至包括三只小猪的居所里都可能摆着一碗不烫也不凉的食物。

也许我们最终会证明，这个充满希望甚至颇有先见之明的童话正好描绘了宇宙的现实。生命绝不稀缺，它可能和行星本身一样普遍。这一切都等待我们去发现。

第十六章　在太阳系中寻找生命

地外生命存在的可能性创造了一些全新的职业，虽然目前寥寥无几，但这些职业的从业者人数随时可能出现爆发式增长。“太空生物学家”或者“天体生物学家”研究的是地外生命，无论它们以什么样的形式出现。目前，除了猜测地外生命的模样以外，太空生物学家只能模拟地外环境，然后要么将地球生命形式暴露在这样的环境中，看看它们能否在不熟悉的严酷条件下幸存，要么将无生命的混合物分子放入模拟环境中，沿着米勒-尤里实验或维奇特萧瑟的研究路线探索生命的起源。他们结合猜测与实验，得出了几个公认的结论，这些结论符合宇宙中的实际情况，因而产生了相当重大的影响。现在，太空生物学家相信，宇宙中的生命需要下列条件：

（1）能量源；

（2）某种有潜力构建复杂结构的原子；

（3）能让分子漂浮其中并发生互动的液态溶剂；

（4）长得足以容许生命诞生、演化的时间。

在这些条件当中，条件（1）和条件（4）很容易满足。宇宙中的每颗恒星都是一个能量源，除了前1%质量最大的恒星以外，其他所有恒星都已经存在了几亿年甚至几十亿年。比如，过去50亿年来，太阳一直照耀着地球，稳定地为我们提供光和热，而且这样的状况还将维持50亿年。现在我们发现，生命能在完全没有阳光的条件下存活，它们生存所需的能量可以来自地热和化学反应。地热能部分来自钾、钍、铀等化学元素的放射性同位素，它们的半衰期以10亿年为单位，可以和太阳之类的恒星媲美。

地球上的生命满足条件（2），我们依赖的基本原子是碳。每个碳原子能与1个、2个、3个或4个原子结合，这样的特性让它成为我们所知的所有生命结构中最关键的元素。每个氢原子只能与一个原子结合，每个氧原子能结合的原子也只有一个或者两个。由于每个碳原子最多能结

合4个原子，它们构成了生命体内几乎所有分子（除了最简单的那些以外）的“脊梁”，其中包括蛋白质和糖。

碳元素构造复杂分子的能力让它与氢、氧和氮一起成了地球生命体内含量最高的四种元素之一。我们已经看到，虽然地壳内含量最高的四种元素与生命体内含量最高的四种元素只有一个是相同的，但宇宙中丰度最高的六种元素囊括了地球生命赖以为生的四大元素，除此以外还有氦和氖。这个事实支持了“地球生命起源于恒星”的假说，我们至少起源于成分类似恒星的天体。无论如何，碳元素在地球表面的含量并不高，但在生命体内却非常丰富，这充分说明，碳在生命结构形成的过程中扮演着至关重要的角色。

对宇宙中的其他生命来说，碳元素也同样不可或缺吗？科幻小说中常常出现以硅为基本构造元素的外星生命，这是否符合宇宙的实际情况？和碳一样，每个硅原子能够结合的最大原子数也是4个，但从化学角度来说，硅键比碳键强得多，所以它不太可能取代碳，成为构造复杂分子的基本元素。碳与其他原子结合形成的化学键相对比较弱，碳-氧键、碳-氢键和碳-碳键都很容易被破坏，所以以碳为基础的分子才能通过碰撞和互动形成新的结构，对任何形式的生命来说，这都是新陈代谢活动的重要组成部分。反过来说，硅和其他很多原子形成的化学键太强，尤其是硅-氧键。地壳的主要成分是硅酸盐，它的主要化学成分就是硅和氧，这两种元素结合形成的强大化学键足以维持上百万年，因此它们很难和其他物质发生反应，形成新的分子。

硅原子和碳原子与其他原子结合的方式差别太大，这个事实清晰地告诉我们，大部分（如果不是全部的话）地外生命应该和我们一样，靠碳（而不是硅）原子来构建最基本的分子结构。除了碳和硅以外，只有少数几种罕见元素的原子能跟4个原子结合，但它们在宇宙中的丰度远低于碳和硅。纯粹从数学角度来说，锗之类的元素（就像地球生命体内的碳一样）成为生命基石的可能性非常非常小。

条件（3）强调的是所有生命形式都需要能让分子漂浮其中并互动的某种液态溶剂。“溶剂”这个词本身就隐含着“让其他分子漂浮其中并互动”的意思，这样的混合物化学家称之为“溶液”。液体能够容纳高浓度的分子，却不会过于严格地限制这些分子的运动。固体会将原子和分子牢牢锁在原地。确切地说，固体内部的原子和分子也能彼此碰撞、互动，但这个过程进行的速度比在液体内部慢得多。气体内部分子的自由度比液体大，它们在碰撞互动时受到的阻碍也更小，但美中不足的是，气体内部的分子发生碰撞和互动的频率远低于液体内部，因为液体的密度通常是气体的1000倍以上。正如安德鲁·马维尔（Andrew Marvell）在诗中所写，“如果有足够多的世界和足够长的时间”，生命起源于气体的概率可能远大于液体。但现实中的宇宙只有140亿岁，所以太空生物学家觉得，我们不太可能找到起源于气体的生命。他们认为，所有地外生命

都和地球生命一样由液态的小囊（细胞）组成，各种不同的分子在小囊内部碰撞产生复杂的化学变化，由此生成新的分子。

孕育生命的液体就一定是水吗？我们生活在一颗水量丰沛的行星上，海洋覆盖了地表接近3/4的面积，这在太阳系中堪称独一无二，哪怕放到整个银河系中恐怕也不太常见。水分子由宇宙中丰度最高的两种元素组成，彗星、流星体、太阳系的大部分行星及其卫星都有至少一定量的水。但太阳系中的液态水仅存在于地球和木星最大的卫星木卫二的冰盖之下，目前科学家认为，整个木卫二表面都被海洋覆盖，但这毕竟只是一种推测，并未得到最终确认。还有其他什么化合物能像海洋或池塘一样提供理想的条件，让分子碰撞、互动，最终孕育出生命吗？能在比较宽泛的温度范围内保持液态的常见化合物有3种：氨、乙烷和甲醇。氨分子由3个氢原子和1个氮原子组成，乙烷分子由2个氢原子和6个碳原子组成，而甲醇分子包含了4个氢原子、1个碳原子和1个氧原子。思考地外生命问题的时候，我们完全可以合理地推测，氨、乙烷或甲醇可能是某些生命的源头，就像地球上的水一样，它们为分子提供了走向辉煌的基础介质。太阳系的四颗巨行星拥有海量的氨，还有相对较少的甲醇和乙烷，而土星最大的卫星土卫六封冻的地表上可能存在液态的乙烷湖。

哪种分子最有可能成为孕育生命的基础溶剂？这个问题背后蕴含着生命的另一个基本要求：这种物质必须保持液态。我们并不指望南极的冰盖或者富含水蒸气的云团能孕育出生命，因为只有液态溶剂才能让分子充分互动。在地球表面的大气压下，水能在0～100摄氏度的范围内保持液态。我们刚才介绍的三种替代溶剂保持液态的温度范围都比水小得多，比如，氨在-78摄氏度结冰，在-33摄氏度蒸发。因此，氨不可能孕育地球上的生命，只有在平均温度比我们低75摄氏度的另一个世界中，氨才有可能成为生命的温床，反过来说，在那样的环境下，水不可能成为生命之源。

我们在化学课上学过，水是实至名归的“万能溶剂”，与此同时，它能在相当宽泛的温度范围内保持液态，但这并不是它最重要的特性。这种化合物最重要的特性在于，大部分物质，包括水在内都会热胀冷缩，但如果将水冷却到4摄氏度以下，它的体积反而会膨胀。随着温度不断逼近0摄氏度，水的密度会显著降低；降到0摄氏度那一刻，水会变成密度更小的冰。冰漂浮在水面上，对水里的鱼儿来说，这可真是个好消息。冬天气温降到冰点以下的时候，4摄氏度的水会沉到底部，因为它的密度大于上方温度更低的水，与此同时，水面上会逐渐形成一层浮冰，冰又会进一步隔绝外部的低温。

如果水没有4摄氏度以下“热缩冷胀”的奇妙特性，冬天的池塘和湖泊都将从下往上而不是从上往下结冰。试想一下，如果低温下的水和世间万物一样热胀冷缩，那么一旦外界气温降到冰点以下，池塘表层的水

就会冷却下来，沉到底部，与此同时，池底温度较高的水会被挤到上面来。这样的对流会让水温迅速降到0摄氏度以下，池塘表面开始封冻。接下来，密度更大的固态冰会沉到池底。就算一个冬天的低温不足以让整个池塘彻底结冰，池底的寒冰也很难融化，年复一年，这个过程不断重复，冻结的冰块也越来越多。在这样一个世界里，冰钓运动必将无以为继，因为所有的鱼都会被冻死。可怜的冰钓者会发现，如果湖面上的冰硬得足以承受踩踏，那么整个湖泊肯定已经冻透了。北极旅行者也不再需要破冰船——要么整个北冰洋都结了冰，破冰船根本没用，要么所有冰都沉在海底，海面仍能正常通航。冬天在湖面上溜冰的时候，你也完全不必担心掉进冰洞里。在这个奇怪的世界里，冰块和冰山会沉到水底，所以1912年4月的泰坦尼克号会喷着蒸汽安全地驶入纽约港，就像广告里吹嘘的那样，这艘船的确永不沉没。

从另一个方面来说，我们也可能陷入了“中纬度偏见”。地球上的大部分海洋根本没有封冻的危险，无论是从上到下还是从下到上。如果冰会沉到水底（而不是浮在水面上），那么北冰洋、五大湖和波罗的海或许会凝固，导致欧洲和美国深受其害，巴西和印度的势力趁机扩张，但地球上的生命可能依然欣欣向荣，丝毫不受影响。

我们不妨暂且假设，相比三位主要的竞争者（氨、乙烷和甲醇），水的确拥有极大的优势，所以大部分（如果不是全部的话）地外生命必须依赖于这种溶剂，就像地球生命一样。以此为前提，再考虑到生命原材料的丰富程度，碳原子的多少，以及生命诞生、演化需要的时间长度，最后我们会发现，至少在太阳系内部，“哪里有生命”这个古老的问题完全可以重新表述为：哪里有水？

单从表面上看，太阳系里的很多地方干枯荒凉，你或许会觉得，虽然水在地球上储量颇丰，但在整个行星系里却不算常见。但事实上，截至目前，在所有由三个原子构成的分子中，水是丰度最高的一种，这很大程度上是因为组成水的两种元素——氢和氧——在整个宇宙的丰度排名中分别位居第一和第三。这意味着我们根本不必问为什么某些天体上有水，而应该问为什么不是所有行星上都存在大量的水。

地球上的海洋来自哪里？月球上保存完好的环形山告诉我们，这颗星球一直在不断经受太空碎片的撞击。所以我们完全可以合理地推测，地球也经历过无数次撞击。的确，地球的尺寸更大，引力更强，所以我们的行星遭受撞击的次数和撞击碎片的尺寸都理应大于月球，这样的撞击自地球诞生之时就开始了，直到现在仍未停歇。归根结底，地球不是突然凭空出现的一个完美球体，它是从孕育太阳和其他行星的那一大团致密气体云中慢慢生长出来的。在这个过程中，地球的体积之所以会不断变大，早期靠的是吸收大量的固体小颗粒，后来则主要依赖富含矿物质的小行星和高含水量彗星的不断撞击。地球到底经历过多少次撞击？我们有理由相信，海洋中所有的水都来自彗星。当然，这套假说仍面临

很多不确定性和争议。比如说，哈雷彗星上的水，氘（这是氢的一种同位素，它的原子核包含了一个额外的中子）含量远高于地球。如果地球上的水真的来自彗星，那么在太阳系形成之初撞击地球的彗星，其化学成分必然迥异于今天的彗星，或者至少迥异于以哈雷彗星为代表的这一类天体。

无论如何，考虑到就连火山喷发也能为大气层补充水蒸气，我们真的不愁如何解释地表水的来源。

如果你想找个没有空气也没有水的地方，那么不妨先看看月球。月球的大气压强几乎为零，白天长度相当于地球上的两周，这样的环境能够迅速蒸发所有水分。月球之夜同样长达两周，气温可能降到-250摄氏度以下，足以冻结万物。因此，造访月球的阿波罗号宇航员需要携带旅途中所需的所有水和空气（以及空调）。

不过，考虑到地球上有这么多水，附近的月球却一点儿水都没有，这事儿就显得很奇怪了。月球表面的水之所以比地球上的更容易蒸发，原因之一很可能是月球的引力比地球小得多。不过，未来的登月任务也许不一定需要携带水，或者人工制造水。月球探测器克莱门汀号（它搭载的设备能够探测恒星际高速粒子撞击氢原子产生的中子）的观测结果印证了人们长久以来的猜测：月球南北极的环形山下方可能埋藏着冻结的冰。月球每年都要经受一定次数的太空碎片撞击，这些碎片中总会有几颗体积较大的富含水的彗星。这些彗星到底有多大呢？要知道，太阳系里的很多彗星融化后足以填满伊利湖。

月球白天的温度高达120摄氏度，我们不能指望新形成的湖泊在这样的环境中幸存，但要是某颗彗星恰好砸到了月球两极附近某个很深的环形山底部（或者自己撞出了一座很深的极地环形山），那么它携带的水可能会在黑暗中保存下来，因为月球上“没有阳光照耀”的地方只有极地附近的深环形山（如果你认为月球上存在“永远黑暗”的一面，那你大概是被流行文化误导了，平克·弗洛伊德1973年的专辑《月之暗面》也起了不好的作用）。渴望阳光的南北极居民深知，无论什么季节、什么时间，这些地方的太阳永远不会升到天顶。现在不妨想象一下，如果你住在月球极地附近的环形山底部，那么太阳哪怕升到最高，也不一定能照射到环形山内部。月球上也没有散射阳光的空气，所以你将永远生活在没有阳光的黑暗之中。

不过，就算是在冰冷的黑暗中，冰也会缓慢蒸发。只要看看长假之后冰箱里的冰格，你就会发现，冰块的尺寸比你出门前小多了。但是，如果冰和大量固体微粒充分混合在一起（就像彗星一样），那么它将在月球极地深深的环形山底部留存数十亿年。如果未来我们选择在这些湖泊附近修建月球前哨站，那必将获得莫大的好处。除了直接融化、过滤冰块获得饮用水以外，我们还能利用这些冰制造氢气和氧气，然后将氢

气和一部分氧气混合起来作为火箭燃料，剩下的氧气可供人类呼吸。除此以外，执行任务之余，宇航员没准还能去滑滑冰。

虽然金星的尺寸和质量都和地球差不多，但我们这颗姊妹星球拥有一些不同于太阳系其他行星的特性，其中特别值得注意的是，金星厚重致密的大气层反射率极高，它主要由二氧化碳组成，这使得金星的地表气压比地球高100倍以上。除了已经适应了海底高压的底栖生物以外，地球上的所有生命都无法在金星的大气环境中生存。但金星最独特的地方在于，这颗行星地表的环形山形成时间相对较晚，而且年龄都差不多。乍看之下，这个描述似乎没什么问题，但细究之下你会发现，这意味着金星在不久前经历过一次全球浩劫，这场浩劫抹去了以前的撞击留下的所有痕迹，所以后来新形成的环形山年龄都差不多，我们也无法通过环形山的地质情况判断行星地貌形成的年代。这样的结果可能源自某种强侵蚀性的天气现象（例如，全球性的洪水），也可能源于全球范围的地质活动，例如，熔岩流会将金星地表变成热爱开车的美国人梦寐以求的样子——整个星球表面都平坦光滑得像铺装路面一样。无论重置金星环形山时钟的事件是什么，它一定突然停了下来。但有一个重要的问题依然悬而未决：金星的水去了哪里？如果这颗行星真的出现过全球性洪水，那么这些水去哪儿了？这些水渗入了地下，还是蒸发到了大气层中？又或者所谓的“洪水”根本不是水，而是另一种常见物质？就算洪水纯属子虚乌有，就像它的姊妹星球地球一样，金星上也应该有彗星带来的大量水。那么这些水到底去哪儿了？

答案似乎应该是，由于金星变得太热（这又得归咎于它的大气层），所有水都已蒸发殆尽。虽然二氧化碳分子能允许可见光通过，但它却能有效截留红外辐射。因此，阳光能穿透金星大气层，但由于大气反射的存在，最终只有一小部分阳光能够抵达地表。这些阳光会加热金星表面，让地面释放出红外线，这部分辐射又会被大气中的二氧化碳分子吸收，金星底层大气和地表都会因此而升温。这种截留红外辐射的现象被科学家命名为“温室效应”，因为温室的玻璃窗也能容许阳光通过，但会锁住部分红外线。和金星一样，地球大气也有温室效应，这会对很多生命产生巨大的影响。科学家估计，与没有大气层的情况相比，温室效应导致地球气温升高了7摄氏度。地球温室效应主要源自大气层中的水和二氧化碳。不过地球大气层中二氧化碳的浓度只有金星的万分之一，所以相对来说，我们体验到的温室效应要温和得多。但是，化石燃料的过度使用使得大气层中的二氧化碳不断增加，所以地球的温室效应正在不断加剧，我们无意中做了一个全球性实验，让大家目睹了大气层截留的额外热量会造成哪些恶劣影响。金星大气的温室效应完全源自二氧化碳，它让这颗行星的温度上升了几十摄氏度，所以金星表面热得像火炉一样，温度高达500摄氏度，这让金星成了太阳系的所有行星中最热的那一颗。

金星为何走到了这样可悲的境地？科学家用“失控的温室效应”这个

术语准确地描述了金星大气截留红外辐射，导致温度上升、液态水蒸发的过程。蒸发到大气中的水又会进一步截留红外线，加剧温室效应，从而导致更多水蒸发到大气层中，形成恶性循环。而在金星大气层顶部附近，阳光中的紫外线会将水分子分解成氢原子和氧原子。由于气温过高，氢原子会从大气层中逃逸，更重的氧原子则与其他原子结合，但没了氢原子，它永远不会再次生成水。随着时间的流逝，金星地表附近的所有水都会慢慢进入大气层，最终永远地离开这颗星球。

地球上也会发生类似的过程，只是速度慢得多，因为我们这里的气温远低于金星。如今地球表面的绝大部分面积被海水覆盖，但这些海都不算深，所有水加起来也只占地球总质量的1/5000左右。即便如此，海水的总质量也达到了惊人的1.5×10^{18}吨，其中2%的海水时时处于冻结状态。如果地球也和金星一样出现了“失控的温室效应”，那么我们的大气将截留更多太阳能，导致气温升高，海水持续沸腾，水分迅速蒸发到大气层中。这样的局面真是糟糕透顶。地球上的动植物显然都会因此灭绝，有一种死法相当惨烈：随着水蒸气越来越多，地球大气层的密度可能增加到原来的300倍，我们会被自己呼吸的空气压碎、烤熟。

我们对行星的迷恋（与无知）绝不仅限于金星。看到火星地表蜿蜒绵长的干涸河床、广阔的冲积平原、星罗棋布的三角洲、密如蛛网的支流遗迹，以及河水侵蚀形成的峡谷，我们可以肯定，这颗星球表面必然曾经存在流动的水，那时的火星宛如一座原始的伊甸园。除了地球以外，如果说太阳系里还有一个地方曾经拥有丰沛的水源，那只能是火星。不过，出于一些我们并不清楚的原因，今天的火星地表早已干涸。仔细审视地球的兄弟姊妹之后，我们不得不回过头来，以全新的视角看待自己的母星：如今地表充沛的液态水其实珍贵而脆弱，随时都可能消失。

20世纪初，美国著名天文学家帕西瓦尔·洛威尔（Percival Lowell）通过望远镜看到了火星地表纵横的“运河”，于是他提出了一个大胆的设想：那是足智多谋的火星人在聚居地附近建立的水利系统，目的是将火星极地冰冠的水引到人口更密集的中纬度地区。为了解释自己的这套假说，洛威尔想象了一个水源几近枯竭的垂死文明，那情景就像凤凰城的居民突然发现科罗拉多河也有干涸的一天。1909年，洛威尔发表了一篇周密详尽却充满误导的论文，在这篇题为《作为生命居所的火星》（*Mars as the Abode of Life*)的文章中，他沉痛悼念了自己想象中濒临灭亡的火星文明。

的确，按照目前火星的干涸情况，这颗星球的地表根本无法支持生命存活。就算现在火星地表还有残存的生命，时间也会缓慢但坚定地将它们彻底清除。随着生命最后的余烬随风而去，这颗星球将成为太空中一个死寂的世界，它的生命演化之路走到了尽头。

不过洛威尔至少说对了一件事。如果火星地表真的曾经存在需要水的文明（或者生命），那它必定已经灭亡，因为在火星历史上某个未知的时间段，出于某些未知的原因，那颗星球的地表水全都干涸了，于是生命必然陷入洛威尔描述的窘境，只不过这一切都发生在遥远的过去，而不是现在。几十亿年前的火星地表曾有丰沛的活水流淌，后来这些水都去了哪里？对行星地质学家来说，这仍是个未解之谜。时至今日，火星极地冰盖里还残余着一些水冰，不过这些冰盖主要由二氧化碳（“干冰”）组成；除此以外，火星大气层中也有微量水蒸气。目前据我们所知，火星上只有极地冰冠还保留着数量可观的水，但这么少的水量完全不符合几十亿年前丰沛的流水在火星地表留下的古老地质记录。

古代火星地表的水要么蒸发到了太空中，要么流进了地底，深藏在这颗行星表面之下的永冻层里。有什么证据能支持这个猜测吗？与小型环形山相比，我们更容易在火星地表的大型环形山边缘找到湿润泥土向外飞溅然后干涸结块的痕迹。如果火星永冻层埋在地底深处，那么只有极强的撞击才有可能触及这样的深度。撞击释放的能量会在接触的瞬间融化地底冰层，导致液态水向上溢出。拥有这种淤泥溅射痕迹的环形山在寒冷的极地区域更为常见——根据我们的预想，这些区域的永冻层应该离地表更近。科学家乐观地估计，如果火星地下永冻层的冰全部融化，那么这些水足以在火星地表形成覆盖全球的深达几十米的海洋。若要全面探查现在的火星是否拥有生命（或者寻找生命曾经存在的化石证据），我们必须调查很多地方，尤其是地表之下的阴暗角落。要想寻找火星生命，我们首先需要回答一个重要的问题：现在火星上有液态水吗？

我们可以从物理学中找到一部分答案。火星表面不可能存在液态水，因为那里的大气压还不到地球表面的百分之一，这样的环境不允许液态水的存在。登山爱好者都知道，气压越低，水的蒸发温度越低。比如，惠特尼山山顶的气压只有海平面的一半，水的沸点也从100摄氏度变成了75摄氏度，而珠穆朗玛峰峰顶气压只有海平面的1/4，这里的水只需要加热到50摄氏度就会沸腾。离地32千米的高空气压只有纽约人行道的1%，所以水的沸点也只有5摄氏度左右。如果再往上走几千米，液态水就会在0摄氏度沸腾，它一旦暴露在空气中就会立即蒸发。科学家用“升华”这个术语来形容物质从固态直接变成气态（跳过了液态）的过程。我们从小就听说过“升华”这个词，卖冰激凌的小贩打开“魔法门”，你看到的不光是美味的冰激凌，还有一块块用来保持低温的“干”冰。比起我们熟悉的普通水冰，干冰更适合保护冰激凌，因为它会从固态直接升华成气态，所以箱子里不会残留任何难以打扫的液体。某个老旧的侦探故事里有这么个情节：一个男人踩在干冰制成的蛋糕上，将自己的脖子套进了绞索，随着干冰慢慢升华，绳子越来越紧，男人一命呜呼，侦探完全不知道他是怎么把自己吊死的（除非他们仔细分析室内的大气成分）。

火星表面的水也会像地球上的二氧化碳一样升华。虽然火星的夏天也有气温超过0摄氏度的时候，但那颗行星表面根本不可能存在液态

水。我们一直认为这样的环境完全不可能孕育生命，直到我们突然意识到，液态水可能存在于火星地下。未来，致力于寻找古代（甚至现代）生命的火星任务将选择适合钻探的区域，我们将深入火星地表之下，寻找能够孕育生命的流淌的灵丹。

虽然在某些人眼里，水是万能的灵丹妙药，但对那些不懂化学的人来说，水却是避之唯恐不及的致命毒素。1997年，爱达荷州鹰岩初中一位14岁的学生内森·佐纳（Nathan Zohner）做了一个后来闻名世界（或者说闻名科普界）的实验，试图借此证明大众的反技术情绪和对化学的恐惧。佐纳邀请人们签署一份呼吁政府严格控制或者彻底禁止使用一氧化二氢的请愿书。他列出了这种无色无味物质的一部分恶劣性质：

·它是酸雨的主要成分；

·它会缓慢溶解接触到的几乎所有物质；

·不慎吸入这种物质可能致命；

·气态一氧化二氢可能导致严重灼伤；

·它存在于末期癌症患者的肿瘤组织中。

根据佐纳的实验结果，50个人里有43个人同意在请愿书上签名，还有6个人举棋不定，只有1个人强烈支持这种分子，拒绝签名。是的，86%的路人投票同意彻底清除环境中的一氧化二氢（H_2O）。

也许火星上的水就是这样消失的。

纵观金星、地球和火星，我们看到了将水（或者其他溶剂）作为生命之源可能带来的回报和问题。寻找液态水的时候，天文学家最先考虑的是那些距离母恒星不远不近，温度环境能够容许液态水存在的行星，所以我们看到了一个“金发姑娘和三只熊”的故事。

40多亿年前，太阳系已经初步成形。金星的位置离太阳太近，强大的太阳能蒸发了这颗行星表面可能存在的所有水。而火星的位置离太阳太远，所以这颗行星上的水冻成了永不融化的冰。只有地球与太阳的距离不远不近，刚好能容许液态水存在，所以这颗行星的表面成了孕育生命的天堂。太阳周围能容许液态水存在的区域被称为“宜居带”。

金发姑娘也喜欢“刚刚好”的东西。三只熊的小屋里摆着三碗粥，其中一碗太烫，一碗太凉，只有第三碗不烫也不凉，刚好合适，所以她喝

掉了这碗粥。小屋楼上还有三张床，其中一张太硬，一张太软，只有第三张不软不硬刚刚好，所以金发姑娘躺在这张床上睡着了。三只熊回到家里，发现桌上的粥少了一碗，床上却多了个姑娘。（这个故事的结局我已经忘了，但我没想明白的是：作为食物链顶端的肉食动物，三只熊怎么没把金发姑娘吃掉呢？）

从宜居的角度来说，金星、地球和火星就像这个故事里的三碗粥和三张床，只是实际情况比童话复杂得多。40亿年前，富含水的彗星与富含矿物质的小行星仍在不断撞击行星表面，只是频率已经降低了很多。在这个宇宙尺度的碰撞游戏中，有的行星从自己形成的位置向内移动了一点，而另一些行星被推到了更远的轨道上。这几十颗行星有一部分移动到了不稳定的轨道上，最终撞向了太阳或者木星，还有一部分行星被撞得离开了太阳系。最终只有几颗行星“刚好”幸存下来，接下来的几十亿年里，它们一直围绕太阳运行。

地球公转轨道与太阳的平均距离是14967万千米。在这样的距离上，地球只能受到二十亿分之一的太阳辐射。假如地球能够吸收照射而来的所有太阳能，那我们这颗星球的平均温度应该是280K左右。正常大气压下，水的冰点是273K，沸点是373K，所以在这个距离上，地球上几乎所有的水都能愉快地保持液态。

不过先别急。讨论科学的时候，答案正确不代表原因也正确。事实上，地球只能吸收2/3的太阳能，剩余的能量都被地表（尤其是海面）和云层反射到了太空中。如果反射充分起到作用，地球的平均气温将下降到255K左右，比水的冰点还低。但我们都知道，地球的实际温度肯定高于冰点，这背后肯定藏着某种升温机制。

再等等。所有恒星演化理论都告诉我们，40亿年前，生命在地球这锅原始汤里刚刚开始成形的时候，太阳的亮度只有现在的1/3，那么当时地球的平均温度应该更低。不过这可能只是因为，在那遥远的过去，地球和太阳的距离比现在更近。只是在大轰炸阶段结束后，出于某种未知的机制，地球从一条稳定轨道进入了另一条更远的稳定轨道。或者，古代地球大气层的温室效应比现在强。我们无法确定到底发生了什么，但我们的确知道，按照我们最初的设想，宜居带与生命之间的关系其实没有那么密切，因为简单的宜居带模型根本无法解释地球历史，更重要的是，要让水或者其他基本溶剂保持液态，不一定需要恒星提供的热量。

利用宜居带寻找生命的方法存在很强的局限性，我们的太阳系里就有两个很好的例子。这两个天体中有一个位于所谓的宜居带以外，也就是说，单靠太阳提供的热量根本无法让这颗天体上的水保持液态，它也从来不曾拥有过覆盖全球的液态海洋。而另一颗天体温度实在太低，根本不可能容许液态水存在，在这样的环境中，孕育生命的溶剂可能不是水，而是一种对我们来说有毒的液体。不久前，我们的自动探测器近距离观测了这两颗天体，现在我们就来看看木卫二和土卫六的情况吧。

木卫二“欧罗巴”的尺寸和我们的月球差不多，这颗卫星表面有交叉的裂缝，而且这些裂缝还会在几周或者几个月内发生变化。对地质学家和行星学家来说，这样的现象意味着木卫二的表面几乎完全由水冰组成，换句话说，这颗卫星外面包裹着一层冰盖，就像地球上的南极洲一样，而且冰层表面的裂缝和沟壑还会不断变化。这个事实指向了一个令人震惊的结论：木卫二的冰盖实际上漂浮在覆盖全球的洋面上。多亏了旅行者号和伽利略号飞船发回的数据，科学家发现了木卫二冰层下的液态水，这才让他们观察到的现象有了合理的解释。这颗卫星表面变化的沟壑遍布全球，所以我们或许可以得出结论：木卫二的冰层下方必然存在覆盖全球的海洋。

这种液体到底是什么？它为什么能保持液态？令人惊讶的是，对于这两个问题，行星学家已经得出了两个颇为可靠的结论：首先，木卫二上的液体应该是水；其次，这些水之所以能维持液态，是因为巨行星木星引发的潮汐效应。宇宙中水分子的丰度大于氨、乙烷和甲醇，所以木卫二冰层下方的液体很可能是水，而且冰层的存在往往意味着附近还有别的水。但是，如果只考虑太阳带来的热量，木星附近的平均温度应该只有120K（-150摄氏度），在这样的环境中，水怎么可能维持液态呢？木卫二内部之所以比较温暖，是因为当木卫二与邻近天体的相对位置不断变化时，木星和附近另外两颗大型卫星（木卫一和木卫三）产生的潮汐力会不断揉搓弯折这颗卫星内部的岩石，由此产生大量的热。无论何时，木卫一和木卫二朝向木星的那一面受到的引力都大于背面，引力的细微差别必然会拉长两颗固态卫星的横向轴径。不过，在公转过程中，卫星与木星的距离会发生变化，木星造成的潮汐效应（卫星正面和背面产生引力差）也会随之改变，使得已经变扁的卫星再次发生微妙的形变。这样的形变又会让卫星内部的温度升高。我们都知道，壁球或回力网球来回撞击（从而形变）的次数越多，它的温度就会变得越高。与此类似，任何持续承受内部压力的系统都会升温。

如果单靠太阳获取热量，木卫一肯定是个冰冷死寂的世界，但事实上，内部压力却让它成了整个太阳系里地质活动最活跃的天体——火山喷发、地面破裂和板块漂移在这儿都是家常便饭。有人认为现在的木卫一就像刚刚成形时冒着热气的地球。木卫一内部的温度极高，所以这里的火山才会不断将带着地狱气息的硫化物和含钠化合物喷到几千米的高空中。事实上，木卫一根本无法容许液态水存在，因为它的温度实在太高。木卫二的潮汐弯折效应就没有木卫一这么明显，因为它距离木星更远，内部升温过程更温和，但也不容小觑。除此以外，木卫二遍布全球的冰盖仿佛罩在洋面上的“高压锅盖”，一方面它阻止了液态水蒸发到空气中，另一方面它又让这些水在亿万年的时间里始终维持液态，不会冻结。据我们目前所知，自木卫二诞生以来，液态水和上方的冰盖就已存在。木卫二的海洋温度接近冰点，但始终保持液态，这样的局面已经维持了45亿年。

因此，木卫二遍布全球的海洋是太空生物学家心目中最重要的调查目标。谁也不知道这颗卫星的冰盖有多厚，可能只有几米，也可能超过0.8千米。考虑到地球海洋中生活着丰富多彩的生命，木卫二可能是我们在太阳系寻找地外生命时的最佳目的地。想想看吧：我们可以在木卫二上冰钓！事实上，加州喷气推进实验室的工程师和科学家已经有了这样的构想：向木卫二发射一枚太空探测器，让它在这颗卫星表面着陆，然后在冰层上找（凿）一个洞，把水下摄像机放进冰洞里，我们没准就能看见在海水中悠游或者在海底爬行的原始生命。

是的，我们所期待的地外生命相当“原始”，因为它们身边可供利用的能量实在太少。无论如何，我们已经在华盛顿州厚度超过1.6千米的玄武岩层下方发现了大量靠地热生存的微生物，这意味着有朝一日，我们或许真的能在木卫二的海洋中找到迥异于地球生命的地外生物。但有一个问题仍悬而未决：这些生物有资格被称作“木卫二人”吗？

火星和木卫二是太阳系内最有可能存在地外生命的两颗天体。第三名与太阳之间的距离相当于木日距离的两倍。土星拥有一颗巨型卫星：土卫六“泰坦”。它和木星最大的卫星木卫三“盖尼米德”在太阳系的所有卫星中位居前二。土卫六的尺寸相当于月球的一半，它拥有厚厚的大气层，这是无可比拟的优势。（水星的尺寸略大于土卫六，但它和太阳之间的距离要近得多，所以水星表面的气体很容易蒸发。）不同于火星和金星，土卫六的大气层主要由氮分子组成，这一点和地球十分相似，而且这颗卫星的大气层比火星的厚几十倍。透明的氮气中飘浮着大量的气溶胶微粒，这层永不消散的迷雾隔绝了我们凝望这颗星球的视线。因此，关于土卫六是否存在生命的问题，我们只能放飞想象，大胆猜测。我们通过地表反射的无线电波（它能穿透土卫六的大气层和气溶胶）测量了这颗卫星的温度，结果发现，土卫六的地表温度约为94K（-179摄氏度），远低于水的冰点，却能容许液态乙烷存在，这种化合物由碳原子和氢原子组成，它是一种重要的石油精炼产物。几十年来，在太空生物学家的想象中，土卫六表面的乙烷湖中漂浮着无数生命，它们悠游自在地进食、相遇、繁殖。

21世纪进入第一个10年，最新的探索终于打破了天马行空的幻想。1997年10月，NASA与欧空局合作研发的卡西尼-惠更斯号土星探测器发射升空。这艘飞船先后借助金星（两次）、地球（一次）和木星（一次）的重力助推，花费了将近7年时间，终于抵达了土星附近。接下来，飞船再次点燃火箭，进入绕土星公转的轨道。

按照科学家最初的规划，惠更斯号探测器应于2004年年底与卡西尼号飞船分离，然后穿过土卫六不透明的云层，降落在这颗卫星的表面上。快速降落的过程中，隔热罩会保护惠更斯号，防止探测器与上层大气摩擦产生的高温损伤设备，进入下层大气以后，它会展开一系列降落伞，借助浮力减速着陆。惠更斯号搭载的6台仪器能测量土卫六大气层

的温度、密度和化学成分，并通过卡西尼号飞船向地球发送照片。在此之前，我们只能静静等待这些数据和照片，惠更斯号将掀开土卫六的面纱，揭示这颗卫星厚重云层之下的秘密。[7]我们不太可能直接看到这颗遥远卫星上的生命（即使它们真的存在），但我们可以根据探测器发回的数据和照片判断那里是否适合生命繁衍生息，比如，我们可以看看地表有没有满是液态的湖泊和池塘。我们至少可以心怀期待：也许土卫六上有地球上没有的分子，这将为我们提供研究太阳系及地球生命起源的全新视角。

如果说水是生命之源，那么寻找地面生命的时候，我们是不是只需要关注那些拥有固态表面因而能够让水体成规模积聚的行星和卫星呢？答案是不一定。水分子和其他几种易于孕育生命的化合物（例如，氨、乙烷和甲醇）也常常存在于冰冷的恒星际气团中。在低温高密度的特殊条件下，借助附近恒星提供的能量，水分子可能被大量转化并导入增强高密度微波束中。这种现象背后的原子物理学原理类似可见光凝聚形成激光。不过在这种情况下，最终产生的不是激光，而是激微波，或者微波激射束。事实上，水不仅广泛存在于宇宙中，有时候还会聚集成束，向你迎面喷来。恒星际云团孕育生命的最大障碍不是缺乏原材料，而是云团内部的物质密度极低，这大大降低了微粒碰撞、互动的概率。如果说在地球这样的行星上，生命可能需要几百万年时间才会慢慢萌芽，那么在密度远低于地球的恒星际云团中，同样的过程可能需要耗费几万亿年——这比宇宙的寿命还要长得多。

在太阳系内寻找生命的过程中，我们似乎也完成了对宇宙起源基本问题的探索。但是，在结束这个主题之前，我们不妨想想未来会迎来的另一个重要的起源：我们与其他文明接触的起源。这是天文领域最引人遐思的主题，也是我们梳理宇宙学相关知识的最好线索。既然我们对其他星球上的生命起源已经有了一些了解，那么现在，我们不妨看看，人类有多大的概率在宇宙中找到有能力与我们交谈的生命。

第十七章　在银河系中寻找生命

我们已经看到，火星、木卫二和土卫六是太阳系内最可能找到地外生命迹象的天体，无论是活的生物还是化石遗迹。到目前为止，这三颗天体最可能拥有水或其他能容许分子碰撞、互动，进而孕育出生命的液态溶剂。

太阳系内可能存在池塘或湖泊的天体似乎只有这三个，所以大部分太空生物学家认为，如果我们真能在太阳系内找到原始生命，那恐怕只能指望这三个地方。悲观主义者更是合情合理地提出，就算这三颗天体中的某一颗或者几颗的确拥有适合生命存活的条件，未来的探索也很可能证明，这些地方根本就没有生命。无论结果如何，针对火星、木卫二和土卫六的探索必将为我们在宇宙中寻找生命提供极具价值的数据和经验。乐观主义者和悲观主义者至少已经达成了一个共识：要想找到高等生命——比简单的单细胞生物（这是地球上最早出现的生命，直到今天，单细胞生物仍是地球生命的主要组成部分）更复杂的生命——我们必须将目光投向太阳系以外，投向那些围绕其他恒星运行的行星。

很久很久以前，我们只能臆测这些行星的存在。但现在我们已经找到了上百颗系外行星，从本质上说，它们都类似太阳系里的木星和土星，所以我们或许可以颇有把握地预测，随着观测手段的进步，我们早晚会找到类似地球的行星。在20世纪最后的几年里，我们似乎发现了一些强有力的证据，足以证明宇宙中遍布宜居行星。因此，德雷克方程中的前两个项（它们共同确定了恒星周围寿命达到几十亿年以上的行星数量）应该对应相当大的数字，不过，接下来的两个项描述的是宜居行星在所有行星中的比例，以及宜居行星真正孕育出生命的概率，系外行星的发现似乎完全无助于确定这两个值，所以我们只能粗略地估计一下。德雷克方程的最后两项描述的是地外生命演化出智慧文明的概率和银河系中智慧文明的平均寿命，如果说方程中间两个项的值我们可以粗略估计，那最后这两个项我们只能猜测。

推测德雷克方程前五个项的数值时，我们可以将太阳系和人类文明作为典型参照物，不过在这个过程中，我们必须时刻牢记哥白尼原则，杜绝以特例自居的心理。但面对方程的最后一个项，即文明拥有发送恒星际信号的技术能力以后的平均寿命，哪怕以地球为参考，我们也根本无法给出确切的答案，因为谁也不知道人类文明能存在多久。近100年前，能够跨越海洋发送信号的无线电发报机问世，我们拥有了发送恒星际信号的能力。但谁也无法预见我们的文明能够继续存在百年、千年还

是百万年，因为我们的能力根本不足以做出这样的预判，而且有很多迹象表明，人类文明的寿命可能不会太长。

即便知道了人类文明的寿命，我们还将面临另一个问题：我们的文明就一定能代表银河系中的普遍情况吗？所以，虽然德雷克方程的最后一个项也将直接影响计算结果，但我们还是只能把它当成未知数。从乐观的角度来看，如果大部分行星系至少拥有一个适合生命存活的天体，并且这些宜居行星有相当高的概率（比如1/10）孕育出生命，而这些生命又有极高的概率（仍然是1/10）发展出文明，那么在银河系的1000亿颗恒星中，至少有10亿颗行星可能孕育文明。当然，我们之所以能得出一个这么大的数字，是因为银河系恒星众多，其中大部分类似太阳。要想看到悲观的计算结果，我们只需要把每种情况发生的概率下调到1/10000，可能存在文明的行星数量就会锐减到原来的1/1000000，也就是说，从10亿颗直接变为1000颗。

这两个数字无疑相差云泥。假设拥有恒星际通信能力的文明平均寿命是10000年（大约相当于银河系总寿命的百万分之一），那么从乐观的角度来看，既然在某个历史阶段可能孕育文明的行星多达10亿颗，那么银河系里应该随时都有大约1000个欣欣向荣的文明。但从悲观的角度来看，任意时刻银河系内只有0.001个文明，如果事实的确如此，那么人类文明显然是个远高于平均值的例外，而且我们必将孤独。

哪种猜测更接近事实呢？从科学的角度来说，实验证据胜于一切。要想确定任意时刻银河系内文明的平均数量，最好的办法是数一数现在银河系里到底有多少个文明。要完成这个任务，最直接的办法当然是全面普查整个银河系，就像电视剧《星际迷航》里的船员最喜欢干的那样：记录我们遇到的每一个文明，对它进行分类和编号——如果我们真能遇到地外文明的话（要是银河系里一个外星文明都没有，那就太无聊了，所以电视剧绝不会采用这样的设定）。不幸的是，这样的调查远超我们如今的技术水平和经费预算。

此外，调查整个银河系可能需要花费几百万年时间，甚至更久。假设某个以星际探索为主题的电视节目严格按照现实来拍摄，那么屏幕上的船员恐怕一整集都在抱怨，因为他们已经在太空中飞了很远很远，但到达目的地仍遥遥无期。“我们已经把船上的所有杂志都读了一遍，”某位船员或许会说，“我们都受够了彼此，尤其是你，船长大人，你简直就是大家的眼中钉、肉中刺。”然后你将看到，几名船员对着自己不停地唱歌，还有一些船员陷入了自我的疯狂世界，紧接着一个长镜头会告诉你，银河系中恒星之间的距离比太阳系内部行星间的距离要远几百万倍。

你可能觉得几百万倍已经很夸张了，但这只是最近的邻居与太阳之间的距离，恒星之间的距离如此遥远，就连光都要耗费几年时间才能从这一颗到达那一颗。周游整个银河系需要的时间当然长得多。恒星际飞船如何跨越这么漫长的距离？对于这个问题，好莱坞电影要么彻底回避

（1956年和1978年的《天外魔花》），要么假设火箭技术或者物理学的进步帮助我们解决了这个难题（1977年的《星球大战》），又或者利用一些有趣的办法，例如，把宇航员冻起来，帮助船员度过漫长的旅程（1968年的《人猿星球》）。

这些方法各有好处，有的还能带来一些颇有创意的可能性。比如说，目前火箭的速度只能达到光速的万分之一左右，根据我们现有的物理学知识，这个速度还有很大的提升空间。不过，就算飞船能够达到光速，要抵达最近的恒星也需要好几年时间，横穿银河系更是需要近一千个世纪。把宇航员冻起来似乎是个好办法，但考虑到恒星际旅行时间漫长，只要地球上的出资人还没被冻起来，他们肯定不愿意痛快掏钱。人类能够集中注意力的时间如此短暂，到目前为止，要与地外文明——如果他们真的存在的话——建立联系，最好的办法似乎还是乖乖待在地球上，等着他们来联系我们。这种方法没什么成本，而且能够提供我们的社会极度渴求的即时回报。

问题只有一个：他们为什么要联系我们呢？我们的星球有何吸引地外文明的独特之处？在这个问题上，人类总是一厢情愿地无视哥白尼原则。随便找个人问问，地球上有什么值得外星人注意的地方，你很可能会收获一个恶狠狠的白眼。几乎所有人都坚信，只要有外星人存在，他们肯定会造访地球，这样的信念与很大一部分宗教教条基于同一个不言自明的前提：我们的星球和我们这个物种是宇宙中的奇迹。哪怕地球只是银河系边缘微不足道的一粒尘埃，我们也注定会吸引全宇宙的注意力——从天文学的角度来说，这事儿怎么看都不合情理。

人们之所以会得出这个狂妄的结论，是因为地球上的我们观察宇宙时看到的现象与实际情况截然相反：对地球上的观察者来说，行星是主宰天空的庞然大物，恒星才是天幕中微不足道的渺小光点，这更符合人们的日常经验。我们和其他所有生物一样生存繁衍，这似乎和周围的宇宙全然无关。银河系的天体虽多，但真正能够影响我们生活的只有太阳和月亮，而且后者的影响力远不及前者。这两颗天体按照严格的规律运行，几乎彻底融入了以地球为基础的舞台背景。我们人类的意识形成于地球之上，基于地球的事物和事件，我们理所当然地认为，地球才是重要的中央舞台，邂逅地外生命不过是遥远背景里微不足道的支线情节。我们的错误在于，设想这类支线情节的时候，我们仍认为自己才是事件的中心。

这样的观念早已扎根在我们的脑海深处，哪怕我们有意识地摈除这样的想法，也很难彻底摆脱它带来的影响。运用哥白尼原则的时候，我们必须时刻警惕大脑中属于爬行动物的部分发出的呢喃，不能理所当然地把自己当成宇宙中心。

回过头审视天外来客造访地球的报告时，我们还需要留意人类思维的另一个陷阱，它和反哥白尼原则的偏见一样普遍，一样富有自我欺骗性：人类过于相信自己的记忆，有时甚至不惜扭曲现实。我们之所以会

表现出这样的倾向，背后的原因和人类认为地球是宇宙中心一样，都是出于生存需求。记忆记录的是我们感知到的东西，要想总结经验以备将来之需，我们必须关注记忆。

但是现在，我们已经有了比记忆更可靠的手段，对重要公共事件的记录不必再依赖个人的记忆。国会辩论和法律以文字的形式记录在案，犯罪现场有录像为证，犯罪活动也可能留下录音证据。我们发现，要永久性地记录发生过的事件，这些媒介比我们自己的大脑更好用。但凡事皆有例外。在法律实践中，目击证言仍被视为是准确的（至少是有效的）证据。我们保留了这一做法，尽管众多试验证明，哪怕当事人刻意用心去记，也很可能无法准确记忆完整的事件，尤其是在异常的刺激条件下，而重要的事件通常伴有这样的特征。法律系统接受目击证言的传统源远流长，不仅仅因为目击证言更容易激起人们的情感共鸣，更重要的是，它往往是唯一的直接证据。无论如何，每当有人在法庭上斩钉截铁地表示“就是这个人举着手枪”的时候，我们必须牢记，有很多案例的目击证人打心底里相信拿枪的就是那个人，但事实却并非如此。

分析不明飞行物（UFO）目击报告的时候，如果你时刻牢记以上事实，那你很快就会发现许多可疑的地方。UFO的定义决定了它总是出现得非常突然，所以目击者往往在平时很少注意的天幕中突然看到它的踪迹，周围还夹杂着大量熟悉或不熟悉的背景物体，而且UFO通常很快就会消失，所以目击者必须迅速做出判断。除此以外，目击者通常坚信自己看到了十分了不得的东西，这简直就是催生记忆谬误的教科书式范例。

除了目击者报告以外，我们还能通过什么途径获得更可靠的UFO数据呢？20世纪50年代，时任美国空军UFO领衔顾问的天体物理学家J.艾伦·海尼克（J. Allen Hynek）总是随身携带迷你相机，他坚持认为，如果看到UFO，他就能用相机及时记录科学证据，因为他知道目击证言并不可靠。糟糕的是，随着技术的进步，伪造的图片和视频足以乱真，所以我们也不能完全相信UFO的图像证据。事实上，考虑到人类记忆的脆弱程度和骗术大师的高超技艺，我们根本不能指望通过某种简单的方式准确分辨真假UFO目击记录。

当我们将目光转向更富时代气息的“UFO绑架”现象，人类扭曲事实的倾向变得更加明显。虽然我们难以统计准确的数字，但近年来，数以万计的人相信自己曾被带上外星飞船并被迫接受检查，而且这些检查往往令人羞耻。从平静客观的角度来说，单凭这样的描述我们就能判断，当事人陈述的根本不是事实。对于这样的事情，直接运用奥卡姆剃刀法则——“最简单的解释就是真相”——我们就能得出结论：所谓的绑架纯属虚构。因为当事人陈述的绑架事件几乎都发生在夜间，而且大部分当事人在事件发生时处于睡眠状态，所以最可靠的解释是，他们处于半睡半醒的状态。很多人在这种状态下会出现幻听和幻视，有时候还会做“清醒梦”，做梦的人觉得自己有意识，却动弹不得。这些感受能骗过大脑的过滤系统，与真实的记忆混淆在一起，所以当事人坚信自己真的经历过

梦中的事情。

如果UFO绑架事件并非出自人们的想象，而是真的发生过，这意味着天外来客的确对地球情有独钟。外星人常常造访地球，所以才有数以千计的人遭到绑架（虽然时间很短），而且经受了详细的检查。（如果这些外星人真想研究什么的话，他们难道不应该早就完成任务了吗？就算他们对人体解剖学特别感兴趣，难道就不能弄几具尸体好好研究一番？）某些故事里还有外星人从被绑架者身上提取有用物质的情节，他们将自己的种子送入女性受害者体内，或者修改被绑架者的思维模式，以逃避追查。（他们就不能直接抹除被绑架者的记忆吗？）哪怕这些故事荒诞不经，我们也不能轻易对它们嗤之以鼻，因为谁也不能排除这样的可能：也许这些漏洞百出的故事都是外星人编出来的，目的是麻痹人类，赋予我们虚幻的安全感，好为他们后面的邪恶计划或者征服宇宙的宏图争取时间。不过，理性分析的能力和清醒的判断力足以帮助我们得出结论：这些绑架故事真实发生过的概率非常非常低。

UFO的支持者和怀疑者似乎都不得不接受我们的结论。如果地外文明真的造访过地球，那他们肯定知道，我们有能力在全球范围内传播信息和娱乐素材——就算有时候你真的很难分清哪些数据是有用的信息，哪些是花边新闻。如果外星访客有意使用这些设施，那他们必将得到最高的礼遇。只要他们愿意，官方机构会立即满足他们的要求（不过想想看吧，他们或许根本不需要地球人的批准），只需要一分钟，他们就能向全世界昭示自己的到来。既然谁也没在电视上见过外星人，那么他们要么根本没来过地球，要么不愿意露面——他们“害羞”。第二种解释又带来了一个有趣的难题：如果外星访客决定藏匿行踪，而且他们的技术水平比我们高得多（毕竟他们有能力跨越漫长的恒星际空间来到地球），那他们的计划怎么总是出纰漏呢？既然外星人不想露面，我们又怎么可能得到那么多证据（目击证言、麦田怪圈、古代宇航员修建的金字塔，还有绑架事件的记忆）？他们一定在玩弄我们可怜的大脑，享受猫和老鼠的游戏。他们很可能还在暗中操纵我们的领袖，这也是政界和娱乐界挥之不去的一团疑云。

UFO现象揭示了人类意识中非常重要的一面。尽管我们坚信地球是造物的中心，头顶的繁星不过是点缀我们这个世界的背景（事实正好相反），但我们仍保持着与宇宙建立联系的强烈愿望，因此，我们才会深信天外来客造访地球的报告，从本质上说，这和古人相信仁慈的神为地球送来闪电和使者如出一辙。我们之所以会养成这样的态度，追根溯源，是因为在历史上极为漫长的一段时间里，对人类来说，头顶的天空和脚下的大地泾渭分明，星星永恒闪耀，但永远无法触及，它们怎么可能都是一回事呢？根据这些事物的不同，我们总结出了地上之物与天上之物的区别，凡俗与神圣之别，自然与超自然之别。为了在现实的这两面之间架起一座精神的桥梁，人类付出了很多努力。但现代科学告诉我们，人类其实都是星尘，这无异于彻底粉碎了我们的精神寄托，直到今天，我们仍无意识地试图找回那个完整的精神世界。对人类来说，UFO是来自“另一面”的新的信使，全知的外星访客映照出我们的无知，尽管

真相就摆在眼前，我们仍视而不见。经典电影《地球停转之日》（1951）成功地捕捉了人类的这种倾向，在这部电影里，智慧远胜于我们的外星访客来到地球，只为了警告我们，无休止的暴力行为可能最终导致人类灭亡。

我们对宇宙的感受天生具有黑暗的一面，所以我们常常将自己对陌生人的情绪投射到外星访客身上。很多UFO报告中都有这样的描述：“我听到外面有奇怪的声音，所以我抓起步枪出去查看。”电影里的外星人也常常被描绘成有敌意的形象，从冷战时期的史诗之作《飞碟入侵地球》（在这部电影里，军队根本没问外星飞船的来意就毫不犹豫地开了火）到21世纪初的《天兆》（这部电影里的英雄热爱和平，所以没带步枪，但他竟然靠着一支棒球棍赶走了拥有跨越恒星际空间能力的外星人）都是这样。

我们之所以很难将UFO报告当成天外访客造访地球的可靠证据，最重要的原因在于地球的平凡地位和恒星之间的漫长距离。当然，这两个原因都无法一锤定音地彻底否认外星访客的存在，但它们的确是相当有力的反面证据。既然地球不是那么富有魅力，那么要想找到地外文明，我们是不是必须等到人类有能力抵达其他行星系的那一天？

不一定。如果银河系内外存在其他文明，那么要和他们取得联系，最科学的办法是尽量利用自然的力量。根据这一原则，我们或许可以将“人类对什么样的地外文明最感兴趣”（答案：有血有肉的访客）这个问题换成：从科学的角度说，最有可能和地外文明取得联系的方式是什么？考虑到恒星之间的漫长距离，答案自然应该是——利用现有的速度最快、价格最低的通信方式，因为对银河系中的其他文明来说，它可能同样廉价且高效。

最快、最廉价的恒星际通信方式是电磁辐射，地球上的远距离通信几乎全靠这种媒介。无线电波让我们能以光速在全球范围内传输文字和图片，这为人类社会带来了翻天覆地的变化。这些信息传递的速度如此之快，如果我们将数据发往离地37015千米高的同步卫星，利用它作为中继将数据传到地球的另一面，那么单边通信延时还不到1秒。

由于恒星之间距离漫长，延时也会相应地增加，这样的事情在所难免。如果我们打算向半人马座阿尔法星发送一条信息，那么单边通信需要4.4年。假如地球发出的信息能在20年内抵达几百颗恒星，或者围绕这些恒星运行的行星，那么发出信息以后，我们需要等上40年才能得到回复。当然，得到回复的前提是这些恒星附近的确存在文明，而且他们对无线电的运用水平至少和我们相当。

我们之所以没有采取这种办法来搜寻地外文明，最根本的原因不在于这个设想本身，而在于我们自己的态度。既然我们有可能永远得不到回复，那么40年的等待时间就显得太长了，不过，要是40年前我们发出了信息，那么现在我们没准已经对周围能够熟练运用无线电的文明有所

了解了。这方面唯一算得上正经的尝试出现在20世纪70年代，为了庆祝波多黎各阿雷西博附近的无线电望远镜成功升级，天文学家利用它向M13星系团的方向发送了一条持续几分钟的信息。这个星系团远在25000光年以外，就算我们能等到对面的回复，那也是很久很久以后的事情了，所以这一尝试更像象征性的演示，而不是真正的实践。如果你觉得人类不愿对外发送无线电波是出于谨慎（面对未知的领域，谨慎总是好的），那不妨想想第二次世界大战之后广播和电视的飞速发展，还有强大的雷达波束技术，这些早已让一批批球壳状的无线电波发送到了太空中。这些信号以光速在宇宙中传播，《蜜月期》和《我爱露西》[8]那个年代的“信息”已经拂过了数千颗恒星，《天堂执法者》和《霹雳娇娃》也覆盖了几百颗恒星。如果其他文明真能从背景噪声中过滤出来自地球的电视节目（传到那些恒星的时候，这些信号的强度应该和太阳系内包括太阳在内的天体发出的辐射差不多），那么这或许可以解释我们为何迄今为止没有得到邻居的音信，他们或许觉得我们的节目骇人听闻，或者过于精彩，所以他们选择沉默。

也许明天我们就将收到一条满载有趣信息和评论的消息。这是电磁辐射通信的最大魅力所在。它非常便宜（向太空中发射50年电视节目需要的成本比不上一次太空任务），而且是即时的——假设我们真能收到另一个文明发来的信息，并且正确理解它的含义。人们之所以对此寄予厚望，原因和大众痴迷UFO如出一辙，只是在这种情况下，我们讨论的是能被记录下来再加以验证的真实信息。

搜寻地外文明计划（SETI）的重点在于寻找无线电信号，不过光波信号也是一种不容忽视的替代通信手段。虽然来自另一个文明的光波必须克服大量自然光源的干扰，但激光束能将光波凝聚成单色或者单频率的电磁波——不同广播站和电视台发射的无线电波正是靠着这样的手段来区分彼此的。如果只考虑无线电波，那么SETI成功的希望在于巡天天线，接收器会记录天线探测到的信息，强大的计算机会分析接收器记录的信号，寻找非自然的痕迹。有两种基本的可能：（1）我们也许会偶然收到其他文明无意中泄漏到太空中的通信信号，就像我们自己发射的广播电视信号一样；（2）我们也可能收到专门发送的信号，旨在吸引未知的天外文明。

前一种可能性实现的难度显然更大。信号束的能量集中于某个特定方向，如果你正好就在这个方向上，那么你很容易探测到它；另一方面，无意中泄漏的信号在各个方向上基本平均分布，所以向外传播一定距离以后，它的强度就会变得远低于成束的信号。此外，从理论上说，信号束中应该包含一些引导信息，以指导接收者解码信号，但无意泄漏到太空中的信号不会有这样的“使用说明”。几十年前，人类文明就有大量信号泄漏到太空中，除此以外，我们还向某个特定方向专门发送过一段长达几分钟的信号束。如果宇宙中的文明真的十分罕见，那我们应该把关注的重点放到无意泄漏的信号上，而不是指望正好碰上一段目标明

确的信号束。

随着计算机系统、天线和接收器技术的不断进步，SETI计划的支持者开始监听宇宙，希望找到其他文明存在的证据。但谁也无法保证我们一定就能听到什么东西，所以这方面的活动募资十分困难。20世纪90年代初，美国国会为SETI计划提供了一年的资助，但头脑冷静的政客不久后就叫停了这个计划。现在，SETI计划相当依赖数以百万计的普通民众，人们从网站上（setiathome.sl.berkeley.edu）下载屏保，通过这种方式将自己的计算机闲时资源贡献出来，帮助科学家分析天线收到的太空信号。还有一些资金来自富裕的个人，其中最值得一提的有微软公司联合创始人保罗·艾伦（Paul Allen）和已故的伯纳德·奥利弗（Bernard Oliver），这位惠普公司的杰出工程师是SETI的终生支持者。奥利弗花费了多年时间思考SETI的基本问题，地外文明发送信息可能使用的频率数以10亿计，怎么筛选信号才最高效？奥利弗试图解决的正是这个难题。我们将无线电波谱分成相对较宽的频段，所以电视和广播信号能使用的频率只有几百种。但从原则上说，外星信号的频率可能非常非常窄，所以SETI天线的"刻度盘"可能需要几十亿个刻度。强大的计算机系统是SETI的核心要素，它能同时分析上亿种频率的信号。但从另一个方面来说，直到现在，科学家仍未找到可能来自其他文明的任何无线电信号。

50多年前，意大利天才科学家恩里科·费米（Enrico Fermi，他可能是最后一位兼修理论和实验的伟大物理学家）与同事共进午餐时讨论了一番地外生命的问题。他们达成了一个共识：作为生命的居所，地球并无特殊之处。几位科学家由此得出结论：银河系中的生命应该相当常见。"既然如此，"费米问道，"那么这些生命在哪儿呢？"几十年来，这个疑问一直没有得到很好的解答。

费米的意思是说，既然我们的星系中应该存在大量先进的技术文明，那么时至今日，我们至少应该通过无线电或激光信号和某个文明取得过联系，甚至有过面对面的接触。就算大部分文明都很短命（正如我们自己的文明可能面临的命运），大量文明的存在也意味着至少有一部分文明能够存活足够长的时间——足以开展搜索其他文明的工作。某些相对长寿的文明可能对搜寻"外星人"不感兴趣，但总会有文明感兴趣的。所以，既然我们现在还没有看到科学上站得住脚的外星人造访记录，也没有收到来自天外文明的任何确凿的信号，那么这个事实或许可以证明，我们大大高估了银河系孕育文明的概率。

费米的观点自有其道理。时间每走过一天，"我们必将孤独"的论点就多得到一份支持。但仔细审视真实的数据，你会发现这方面的证据还不够有力。假设银河系内随时都有几千个文明，那么相邻文明的平均距离应该是几千光年，差不多相当于相邻恒星距离的1000倍。如果这些文明中有一个或者几个能够存在几百万年，那么时至今日，他们应该已经向我们发出了信号，或者我们应该已经监听到了他们无意中泄漏的信号。但是，如果任何文明都无法维持这么长时间，那么要想找到银河系

里的邻居，我们必须付出更多努力，因为除了我们之外，主动在银河系中寻找兄弟姊妹的文明可能一个都没有，他们泄漏的广播信号可能太微弱，无法被我们的天线捕获。

这样一来，我们又回到了熟悉的境地之中，仿佛永远都在等待某件可能根本不会发生的事情。人类历史上最重要的消息也许明天就会传来，也许明年会传来，也许永远不会传来。所以我们不妨敞开怀抱，走向下一个黎明，拥抱周围充满能量和秘密的闪耀宇宙。

尾声　在宇宙中寻找我们自己

带着自己的五感，人类开始探索周围的宇宙，并将这场冒险命名为科学。

——埃德温·P.哈勃，1948

人类感觉的敏锐程度和适应范围都出色得令人震惊。我们的耳朵既能捕捉航天飞机发射时的轰鸣，又能分辨房间角落一只蚊子的嗡嗡声。触觉让你能够感知保龄球砸中脚趾的冲击，又能察觉一只重量仅有1毫克的虫子正在爬过你的手臂。有人喜欢大嚼哈瓦那辣椒，而有人敏感的舌头能识别出浓度仅有百万分之几的食物香精。我们的眼睛既能适应阳光下明亮的沙地，又能毫不费力地透过黑暗看到几百英尺外一根刚刚点燃的火柴。人类的眼睛不光能看到房间对面的东西，还能遥望宇宙深处。如果没有视觉，天文学将永远不可能诞生，我们也永远不可能拥有测量宇宙的能力。

所有感觉综合在一起，赋予了我们分析周围环境的能力，比如，我们可以分析现在是白天还是夜晚，或者眼前这头动物是不是打算吃掉你。但很少有人知道，感觉为我们提供的只是了解物理世界的一扇小窗，直到最近几百年，人类才开始意识到这个问题。

有人吹嘘自己拥有第六感，也就是说，他擅长感知或者“看见”别人察觉不到的事情。占卜者、读心者和神秘主义者最爱吹嘘这种神秘的力量。他们通过这种方式潜移默化地影响他人。从本质上说，通灵学这门可疑的生意之所以有利可图，是因为人们相信，至少有一部分人真的拥有这方面的能力。

与此相对，现代科学运用的“感觉”多达几十种。但科学家不会将它们描述为某种神秘的力量，只是这些专门的硬件能将超出人类感知范围的“感觉”转化成能被我们固有的五感能够感知的表格、数据、图标或图像。

说到这里，我得向哈勃道个歉。我们在本章开头引用了他的名言，虽然这句话凄美而富有诗意，但更符合事实的描述应该是：

带着自己的五感，以及望远镜、显微镜、质谱仪、地震仪、磁力计、粒子探测器、加速器和记录整个电磁波谱辐射的设备，我们开始探索周围的宇宙，并将这场冒险命名为科学。

想想看，要是人类天生拥有频率可调的高精确度眼球，那么我们眼中的世界将变得多么丰富，我们发现宇宙基本特性的脚步又将加快多少。向上拨动无线电波谱的“旋钮”，你会发现除了某些特定的方向以外，白日的天空跟夜晚一样漆黑，银河系中心成了天空中最亮的一个点，就连人马座的几颗主序星也遮不住它耀眼的光芒。但调到微波波段，你会看到整个天空都闪烁着极早期宇宙留下的共振，自大爆炸后38万年开始，这道光墙就迎面向我们行来，直至今日。调到X射线波段，你会立即看到黑洞的位置，物质打着旋儿坠向深渊。调到伽马射线波段，你将看到遍布宇宙、位置随机的壮丽爆炸，频率约为每天一次。这样的爆炸会加热周围的物质，制造出X射线、红外线和可见光。

如果我们天生自带磁力计，那么人类永远不会发明罗盘，因为谁也用不着它。只需要将你体内的磁力计调到平行于地球磁场线的方向，你就会看到磁北极像童话里的奥兹国一样浮现在地平线上。如果人类的视网膜自带频谱分析仪，那我们就不必费劲研究大气成分。只需要看一眼，我们就知道空气中的氧够不够人类呼吸。除此以外，早在几千年前我们就会知道，银河系内恒星和星云包含的化学元素和地球上的一模一样。

如果我们生来拥有敏感的大眼睛和内置的多普勒运动探测器，那么早在穴居人的时代，我们就该发现整个宇宙在膨胀，所有遥远的星系都在逐渐离我们远去。

如果我们双眼的分辨率堪比高性能显微镜，那谁也不会觉得瘟疫和其他疾病是上天的惩罚。你将亲眼看到致病的细菌和病毒钻进你的食物，或者溜进皮肤上的开放伤口。只需要做几个简单的实验，你就能轻松分辨哪些微生物是好的，哪些是坏的。我们很可能在几百年前就找到了术后感染的罪魁祸首，早早地解决了这个难题。

如果人体能探测高能粒子，那么我们应该远远地就能感觉到放射性物质的存在。盖革计数器将沦为废品。你甚至能看到氡气透过地下室的地板渗进你家，而不必花钱雇人来检查。

从出生开始，每个人都在不断磨砺自己的五感，有了这个过程，成年人才能形成“正常”的世界观，并以此为基础来判断我们遇到的事件或现象是否“合理”。但问题在于，过去一个世纪几乎没有以人类直接感觉为基础的重要科学发现。重要的发现都来自超越感官的数学方法和硬件。这个简单的事实很好地解释了对普通人来说，相对论、粒子物理学和十一维弦论为什么都显得荒诞不经、毫无道理。这份清单上还有黑

洞、虫洞和大爆炸。事实上，就连科学家都觉得这些概念有些荒谬，但是后来，对宇宙的长期观察从技术上证明了它们的合理性。于是我们最终建立了更新、更高等级的“超常识”，这赋予了科学家新的创造性思维方式，所以他们才能更好地理解那些陌生的新世界，例如原子的微观王国和令人费解的高维空间。关于量子力学的创建，20世纪的德国物理学家普朗克也有同感：“现代物理学最大的意义在于，它揭示了超越我们日常感知的另一部分的现实；这部分现实也存在问题和冲突，对我们来说，它们的价值甚至超过了这个世界上最富饶的经验宝藏。”

每一种新的观测手段都将为我们打开一扇观察宇宙的新窗，新的探测器又将为越来越长的“非生理感觉清单”增添新的一笔。一次次的进步不断地将我们送上理解宇宙的新高度，仿佛我们正在演化成为某种超感知的存在。有了这些人造“感官”，在解密宇宙的过程中，我们对自身的认知又将取得怎样的突破？我们之所以执着于这个问题，不仅仅是出于简单的好奇心，更是为了探索我们这个物种在整个宇宙中的位置。其实这个问题并不新颖，这是个十分古老的问题，纵观历史，来自不同文化的思想者多多少少都琢磨过这方面的事情。下面这段诗句很好地总结了我们目前的发现：

我们将不停止探索

而我们一切探索的终点

将是到达我们出发的地方

并且是生平第一遭知道这地方……

——T.S.艾略特，1942[9]

致谢

感谢普林斯顿大学的罗伯特·卢普顿（Robert Lupton）反复阅读本书手稿，帮助我们用文字准确地表达想要表达的东西。他在天体物理学和英语上的造诣为这本书提供了极大的帮助，如果没有他，我们完全无法想象这本书能达到如今的水平。我们同样感谢芝加哥费米研究所的西恩·卡罗尔（Sean Carroll）、夏威夷大学的托拜厄斯·欧文（Tobias Owen）、美国自然历史博物馆的史蒂文·索特尔（Steven Soter）、加州大学圣迭戈分校的拉里·斯夸尔（Larry Squire）、普林斯顿大学的迈克尔·斯特劳斯（Michael Strauss）和美国公共广播公司“新星”系列的制作人汤姆·利文森（Tom Levenson），感谢你们为本书提供关键的修改建议。

感谢格纳经纪公司的贝琪·勒纳（Betsy Lerner），自始至终，你一直都对这个项目充满信心。在你眼里，我们这本手稿不仅仅是一本普通的小书，它还承载着我们对宇宙最深的热忱，值得分享给尽可能多的读者。

本书卷二的大部分内容及卷一、卷三中的部分内容曾由尼尔·德格拉斯·泰森（Neil deGrasse Tyson，后文简称NDT）以短文的形式首次发表于《自然历史》（*Natural History*）杂志。为此，他深深感谢该杂志主编彼得·布劳恩（Peter Brown）和资深编辑阿维斯·朗（Avis Lang），他们是泰森写作道路上的牧者。

作者非常感谢斯隆基金会（Sloan Foundation）在本书筹备和撰写过程中提供的帮助。我们对该组织为此类科普项目提供的支持深表敬意。

尼尔·德格拉斯·泰森，纽约市

唐纳德·戈德史密斯，伯克利，加州

2004年6月

术语表

热力学温标：又称绝对温标或开尔文温标，简称开氏温标，得名于物理学家开尔文，单位为开尔文（K），水的冰点和沸点分别是273.16K和373.16K。0K代表绝对零度，即理论上能达到的最低温度。

加速度：物体运动速率或方向（或二者）的变化。

堆积：物质汇集在某物体表面上。

吸积盘：围绕大质量天体（尤其是黑洞）做轨道运动，并沿螺旋轨迹缓慢向内坠落的物质。

活动星系核（AGN）：这个天文学术语描述的是比普通星系中央区域亮几千倍、几万倍甚至几十万倍的特殊星系核。AGN和类星体系出同源，但根据我们的观察，AGN和地球之间的距离通常比类星体更近，所以它们在自身生命周期中所处的阶段应该晚于后者。

氨基酸：一类相对较小的分子，由13～27个碳原子、氮原子、氢原子、氧原子和硫原子组成，这些分子可以首尾相连形成长链蛋白质分子。

仙女座星系：离银河系最近的大型旋涡星系，距离我们大约240万光年。

反物质：物质的互补形态，构成反物质的反粒子质量与普通粒子完全相同，但电性正好相反。

反粒子：普通物质粒子的互补形态。

视亮度：观察者看到的天体亮度。天体的视亮度由它自身的亮度和它与观察者之间的距离共同决定。

古菌：代表生命的三个域之一，人们认为古菌是地球上最古老的生命形式。所有古菌都是单细胞嗜热生物（它们能在超过50摄氏度甚至70摄氏度的环境中繁荣生长）。

小行星：绕太阳公转的一类天体，主要由岩石（或者岩石和金属的混合物）构成。大部分小行星位于火星和木星之间的小行星带，直径从100米到1000千米不等。性质类似小行星但尺寸更小的天体被称为“流星体”。

天文学家：研究宇宙的人。这个词在过去较为常用，那时候我们还没有总结归纳出各种天体的特征光谱。

天体物理学家：利用我们已知的所有物理学定律研究宇宙的人。“天文学家”的现代称呼。

原子：呈电中性的元素最小单元。原子由原子核和核外电子组成，其中原子核包含一个以上的质子和零个以上的中子，核外电子的数量等于原子核携带的正电荷数，这个数字决定了原子的化学性质。

细菌：地球生命的三个域之一，它的正式名称是“原核生物”。所有细菌都是单细胞生物，它们没有包含遗传物质的边界清晰的细胞核。

棒旋星系：中央区域的恒星和气体比较密集，形成了拉长棒状结构的特殊旋涡星系。

大爆炸：对宇宙起源的科学描述。按照大爆炸假说，大约140亿年前，一场惊天动地的爆炸创造了所有的空间和物质。今天的宇宙仍在继续朝着所有方向膨胀，这是大爆炸留下的余韵。

黑洞：引力极强的天体，在黑洞中心附近一定的范围内，任何物体，包括光线，都无法逃脱它的引力，这个范围被称为黑洞半径。

黑洞半径：质量为太阳的M倍的黑洞，其史瓦西半径约为3M千米，这个范围又被称为黑洞的“事件视界”。

蓝移：趋向于高频短波的偏移，通常源自多普勒效应。

棕矮星：成分类似恒星，但质量不足以在核心区域引发核聚变（从而形成恒星）的天体。

碳水化合物：仅由碳、氢和氧这三种元素组成的一类分子。碳水化合物分子内部氢原子的数量通常是氧原子的两倍。

碳：碳元素的每个原子核拥有6个质子，它的几种同位素分别包含了6个、7个或8个中子。

二氧化碳：每个CO_2分子由1个碳原子和2个氧原子组成。

卡西尼-惠更斯号：1997年，这艘飞船从地球发射升空，2004年7月，它到达了土星。此后，卡西尼号轨道器探测了土星及其卫星，释放出去的惠更斯号探测器则降落在土星最大卫星——土卫六——的表面上。

摄氏温标：瑞典天文学家安德斯·摄尔修斯于1742年引入了这套以他的名字命名的温标。摄氏温标下，水的冰点和沸点分别是0摄氏度和100摄氏度。

催化剂：加快或减缓特定原子或分子之间反应速率的物质，但它自身并不参与化学反应。

细胞：所有地球生命形式共有的结构和功能单元。

染色体：一个DNA分子加上与该分子相连的蛋白质。遗传信息储存在染色体内部名为“基因”的亚单元之中，细胞复制过程中，染色体能将这些信息传递下去。

文明：按照SETI的定义，一个群体至少应该拥有不弱于我们的恒星际通信能力，才能被称为“文明”。

宇宙背景探测者（COBE）卫星：1989年发射的一颗卫星，它观测了宇宙背景辐射，并且首次发现了天空中不同方向上宇宙背景辐射的细微差异。

彗星：太阳系原始物质形成的碎片，通常是一个由冰、岩石、尘埃和冻结的二氧化碳（干冰）组成的“脏雪球”。

星座：我们在地球上观察到的距离较近的一组恒星，通常以动物、行星、科学设备或神话人物为名，直接以形状特征为名的星座非常罕见，天空中共有88个星座。

宇宙背景辐射（CBR）：诞生于大爆炸之后不久的无处不在的光子海洋，直到今天，它仍充满整个宇宙，目前CBR的特征温度是2.73K。

宇宙常数：爱因斯坦在描述宇宙整体行为的方程中引入的一个常数，它代表的是每立方厘米看似空旷的空间中包含的暗能量。

宇宙学家：专门研究宇宙起源及大尺度结构的天体物理学家。

宇宙学：将宇宙作为整体来研究其结构及演化过程的学科。

暗能量：现有的任何手段都探测不到的隐形能量，它的值由宇宙常数决定。暗能量是宇宙膨胀的原因。

暗物质：不与电磁辐射相互作用的物质形态，我们只能通过暗物质作用于可见物质的引力反推出它的存在。

去耦：宇宙历史上光子的能量首次降到阈值以下，从此以后再也无法与原子产生互动的时期。在这个阶段，原子第一次得以成形，不再被光子击碎。

脱氧核糖核酸（DNA）：一种复杂的长链分子，由两股螺旋组成，长链上数以千计的小分子彼此交缠，紧紧相依。DNA分子分裂复制时会沿着长度方向解开螺旋，每一对交缠的小分子都会分开。分裂之后的两个半个DNA分子都会组织周围环境中的小分子，形成一个和原始分子一

模一样的新分子。

多普勒效应：如果光源正沿着观察者视线的方向靠近或远离，观察者看到的光子频率、波长和能量都会发生变化，这就是多普勒效应。任何一种波都可能出现多普勒效应，具体取决于波源和观察者之间沿视线方向的相对运动。

多普勒频移：多普勒效应造成的频率、波长和能量的变化。

双螺旋：DNA分子的基本结构形状。

德雷克方程：美国天文学家弗兰克·德雷克首次提出的这个方程综合描述了我们估计的目前或任意给定时刻银河系中拥有恒星际通信能力的文明数量。

干冰：冻结的二氧化碳。

尘埃云：温度低得足以允许原子结合形成分子的恒星际空间中的气体云，很多分子会自发组合起来，形成包含上百万个原子的尘埃微粒。

动力学：研究物体互动产生的力和运动的学科。研究太阳系和宇宙的动力学通常被称为“天体力学”。

监听：试图捕捉地外文明无意中泄漏的无线电信号，借此证明其存在的技术。

偏心率：衡量椭圆扁度的参数，偏心率等于椭圆两个焦点之间的距离与其长轴之比。

蚀：某个天体被另一个天体部分或完全遮挡的现象，在观察者看来，被“蚀”的天体仿佛躲到了另一个天体后面。

电荷：基本粒子的固有特性，电荷可能是正的，可能是负的，也可能是零。在电磁力的作用下，携带不同电荷的粒子会互相吸引，携带相同电荷的则会互相排斥。

电磁力：四种基本力之一，作用于带电粒子，与粒子之间的距离成反比。研究表明，电磁力和弱核力实际上是同一种电弱力的不同表现形式。

电磁辐射：光源释放的携带能量的光子洪流。

电子：携带一个负电荷的基本粒子，原子内部的电子绕原子核旋转。

电弱力：电磁力和弱核力的统一形式。在相对较低的能量下，这两种力的表现形式很不一样，但在高能状态下（例如，宇宙诞生之初的阶

段），这两种力又会合二为一。

元素：物质的基本成分，以原子核包含的质子数为基本分类特征。宇宙中所有普通物质由92种元素组成，从最小的氢原子（原子核内只有1个质子）到最大的自然元素铀（原子核内有92个质子）。比铀更重的元素只能在实验室里合成。

基本粒子：自然界的基本微粒，通常无法再分割成更小的粒子。质子和中子通常被视为基本粒子，虽然这两种微粒分别由3个名叫“夸克”的粒子组成。

椭圆：一条封闭曲线，椭圆曲线上任意一点到其内部两个固定点（焦点）的距离之和永远相等。

椭圆星系：恒星呈椭圆状分布的星系，几乎不包含星际气体或尘埃，它的二维投影看起来很像一个椭圆。

能量：做功的能力；物理学意义上的“功”定义为作用于特定距离的一定量的力。

质量能：等同于特定质量的能量，其值等于质量乘以光速的平方。

酶：一种分子，可能是蛋白质或RNA，它可以帮助分子发生特定形式的互动，加快分子特定反应的速度，因此，酶是一种催化剂。

逃逸速度：足以让抛射物或飞船克服引力，不再落回原地的最小速度。

真核生物：地球生命的三个域之一。真核生物可能是单细胞生物，也可能是多细胞生物，它们共同的特征在于，我们在它们体内能够找到边界清晰的细胞核。

木卫二：木星的四颗大型卫星之一，最显著的特征是覆盖全球的冰层。

事件视界：黑洞半径的带有诗意的另一个名字，定义为黑洞中心附近任何事物都无法逃逸的范围。越过事件视界的任何事物都不可能逃脱黑洞的引力。因此，我们或许可以认为，事件视界就是黑洞的“边缘”。

演化：生物学意义上的演化指的是自然选择的过程，在特定的环境条件下，同一类生物（物种）的后代会随着时间的推移产生变化，最终它们的结构和外形都会变得大相径庭；从广义上说，事物缓慢变化成另一种形式或状态的过程都叫“演化”。

系外行星：绕太阳以外的其他恒星旋转的行星。

极端微生物：能在高温（通常是70～100摄氏度）环境中繁荣滋长

的生物。

裂变：较大的原子核分裂成两个以上较小原子核的过程。大于铁的原子核裂变时会释放能量。目前人类的所有核电厂都靠裂变（又叫“核裂变”）提供能量。

力：广义的力指的是能够制造物理变化的举动；作用于物体的力倾向于改变物体在作用方向上的速度。

化石：古生物留下的残骸或痕迹。

频率：对光子来说，频率指的是光波每秒振荡的次数。

聚变：较小的原子核聚合形成较大原子核的过程。小于铁的原子核聚变时会释放能量。聚变为全世界的核武器和宇宙中的所有恒星提供了主要的能量来源。聚变又叫“核聚变”或“热核聚变”。

星系：从几百万颗到几千亿颗不等的一大群恒星相互吸引形成的结构，星系中通常还有大量的气体和尘埃。

星系团：多个星系组成的大团，通常包含气体、尘埃和大量暗物质，这些在共同的引力作用下聚集在一起，形成星系团。

伽利略号：1990年，NASA向木星发射的飞船。伽利略号于1995年12月抵达木星，并向木星大气层发射了一枚探测器；接下来的几年里，这艘飞船一直绕着这颗巨行星公转，为木星及其卫星拍摄照片。

伽马射线：能量和频率最高、波长最短的电磁辐射。

基因：染色体上由基因编码定义的特殊片段，基因决定了特定氨基酸链的结构。

基因编码：DNA或RNA分子内部的“字母”组合，每个基因编码都代表一种特定的氨基酸，它由三个连续的小分子组成，这些小分子也是构成DNA分子交缠双螺旋的基本单元。

基因组：某个生命体所有基因的集合。

广义相对论：爱因斯坦于1915年提出的理论，广义相对论是狭义相对论的自然扩展，它适用于有加速度的参照系。这种现代的引力理论成功地解释了牛顿引力理论无法解释的大量实验结果。广义相对论的基本前提是“等效性原理”，比如说，飞船里的人无法分辨自己乘坐的飞船是在空间中加速前进还是在引力场（其引力能够产生同样的加速度）中保持静止。这个简单但基本的原则彻底颠覆了我们对引力的理解。根据爱因斯坦的理论，引力根本不是传统意义上的“力”，而是有质量的物体附近的空间弯曲。物体的运动完全取决于它的速度与空间弯曲的程度。虽

然这种反直觉的说法听起来十分怪异，但广义相对论能够解释人类有史以来研究过的引力系统已知的所有行为，而且它预言了大量更加反直觉的现象，后来的实验相继验证了这些预言。比如说，爱因斯坦预测强引力场会弯曲空间，使光线发生明显的弯曲；后来我们发现，经过太阳边缘的星光（日全食为我们提供了最理想的观测机会）的确会发生弯曲，而且偏移量完全符合爱因斯坦的预测。广义相对论最成功的应用或许在于，它成功描述了我们这个膨胀的宇宙的现实：在数千亿个星系共同的引力作用下，宇宙中的所有空间实际上都是弯曲的。广义相对论还做出了一个十分重要但尚未得到验证的预测，那就是“引力子”的存在——这种携带引力的微粒能在引力场中产生突变，就像超新星爆炸时一样。

巨行星：尺寸和成分类似木星、土星、天王星或海王星的行星。巨行星由固态的岩石内核和冰组成，外面包裹着厚重的气体层，这些气体的成分主要是氢和氦。巨行星的质量范围从地球的十多倍到几百倍不等。

引力：四种基本力之一，永远相互吸引。任意两个物体之间的引力与其质量之积成正比，与二者之间距离的平方成反比。

引力透镜：天体释放的强大引力能够弯曲附近的光线，聚焦形成一个更明亮的虚像。如果没有引力透镜，观察者不可能看到这么亮的图像。

引力辐射（引力波）：引力辐射和电磁辐射不一样，但它们同样以光速传播，大质量物体高速擦肩而过时会产生大量引力波。

温室效应：行星大气层截留红外辐射的效应，它会使行星表面和正上方的温度升高。

宜居带：恒星周围能允许一种或多种溶剂以液态形式存在的范围，实际上是一个内外边界分明的环状球壳。

晕：星系最外层的区域。星系晕占据的体积远大于可见的星系本体，星系中的大部分暗物质都存在于这个区域。

氦：宇宙中第二轻的元素，丰度也位居第二。氦原子核拥有2个质子，以及1～2中子。恒星的能量就来自氢原子核（质子）聚变形成氦原子核的过程。

赫兹：频率单位，定义为1秒内振动的次数。

哈勃常数：出现在哈勃定律中的常数，描述星系的距离及其退行速度的关系。

哈勃定律：该定律描述我们今天观察到的宇宙膨胀，根据哈勃定律，遥远恒星的退行速度等于它和银河系之间的距离乘以一个常数。

哈勃太空望远镜：1991年发射的太空望远镜，它成功拍摄了大量天体的可见光高清照片，因为这台望远镜身在太空中，所以它能摆脱地球大气层不可避免的干扰和吸收效应，自由地观察宇宙。

氢：宇宙中最轻、丰度最高的元素，每个氢原子的原子核只有1个质子，但中子数可能是0，也可能是1或者2。

红外线：波长大于可见光、频率小于可见光的光子组成的电磁辐射。

初始奇点：宇宙膨胀（“大爆炸”）开始的那一刻。

内层行星：太阳系内的水星、金星、地球和火星，内层行星体积小、密度大，而且主要由岩石组成。

恒星际云团：恒星际空间中密度远大于平均值的区域，直径通常绵延几十光年，物质密度从每立方厘米十个原子到几百万个分子不等。

恒星际尘埃：每个尘埃微粒由上百万个原子组成，这些微粒很可能是从红巨星极其稀薄的大气层喷射到恒星际空间中的。

恒星际气体：星系中不属于任何恒星的气体。

离子：失去了一个或多个电子的原子。

离子化：剥夺原子的一个或多个电子，使之变成离子的过程。

不规则星系：形状不规则的星系，也就是说，它既不像旋涡（碟状）又不像椭圆。

同位素：特定元素的原子核，所有同位素包含的质子数完全一样，但中子数不尽相同。

詹姆斯·韦伯太空望远镜（JWST）：计划于21世纪初投入使用的太空望远镜，它将成为哈勃太空望远镜的继任者。JWST的镜头更大，携带的设备也更先进。

动能：物体由于运动而具有的能量，定义为物体质量的0.5倍乘以速度的平方。因此，如果两个物体运动速度相同，那么质量大的物体（譬如一辆卡车）拥有的动能必然大于质量小的物体（譬如一辆自行车）。

柯伊伯带：距离太阳从40天文单位（冥王星与太阳的平均距离）到几百天文单位之间的环状区域，里面充满了太阳原行星盘残留下来的碎片。冥王星是柯伊伯带最大的天体之一。

大麦哲伦云：银河系两个不规则卫星星系中较大的那个。

纬度：地球上的纬度是一套标示南北方向的坐标系，赤道的纬度为0°，南北极则分别是南纬90°和北纬90°。

光年：光或者其他形式的电磁辐射1年行经的距离，约等于10万亿千米。

本星系团：银河系附近的几十个星系。本星系团包括大小麦哲伦云和仙女座星系。

对数尺度：记录一整张纸都写不下的大数字的一种方式。用数学术语来说，对数尺度呈指数增长（1，10，100，1000，10000）而非算术增长（1，2，3，4，5）。

经度：地球上的经度是一套标示东西方向的坐标系，人为定义的“本初子午线”是一条经由英国格林尼治天文台，贯穿南北极的大圆。从本初子午线出发，东经180°至西经180°囊括覆盖了整个地球表面。

亮度：天体每秒释放的所有形式的电磁辐射的总能量。

质量：度量物体物质内容的物理量。请勿将质量与重量混淆，后者衡量的是物体受到的引力。

大灭绝：地球生命史上的重大事件，有时候由剧烈的撞击引发，导致地球上相当一部分生物物种在极短的地质时间内彻底灭绝。

新陈代谢：生命体所有化学过程的统称，定义为生物利用能量的速度。新陈代谢率高的动物必须更频繁地摄取能量（食物）才能维持生命。

流星：流星体穿过地球大气层时摩擦生热留下的明亮轨迹。

流星雨：地球在短时间内遭遇轨道上的大量流星体造成的现象，表现为天空中特定角度突然出现大量流星。

陨石：经过与地球大气层的摩擦仍残存下来的流星体。

流星体：太阳公转轨道上由岩石和/或金属组成的天体，体积小于小行星。一部分流星体是太阳系形成过程留下的残骸，还有一部分是太阳系内的天体互相碰撞产生的碎片。

银河系：包含了太阳和另外大约3000亿颗恒星的星系。除了恒星以外，银河系里还有恒星际气体、尘埃和大量暗物质。

模型：思维概念，通常由纸笔或高速计算机辅助创建，代表现实的简化，让科学家得以将某种条件下最重要的过程单独提取出来加以分析理解。

修正版牛顿力学（MOND）：以色列物理学家莫德采·米尔格若姆提出的一种变体引力理论。

分子：两个以上原子组成的稳定结合。

突变：生物DNA产生的能被后代继承的变化。

星云：弥散的气体和尘埃，通常会被内部新形成的高亮度恒星点亮。

中微子：一种质量远小于电子的电中性基本粒子，由弱核力主宰的基本粒子反应是创造或吸收中微子的主要过程。

中子：一种电中性的基本粒子，组成原子核的两种基本成分之一。

中子星：超新星爆炸核心留下的微型残骸（直径小于32千米）。中子星几乎完全由中子组成，所以它的密度极大，16立方厘米的空间中包含的物质足以填满2000艘远洋轮船。

氮：每个原子核拥有7个质子的元素，氮同位素的原子核可能包含6个、7个、8个、9个或10个中子。大部分氮原子核拥有7个中子。

核聚变：两个原子核在强核力的作用下融为一体。原子核必须靠近到小于质子尺寸的距离才有可能发生聚变。

核苷酸：DNA和RNA内部交缠的分子。DNA的四种核苷酸分别是腺嘌呤、胞嘧啶、鸟嘌呤和胸腺嘧啶。RNA内部没有胸腺嘧啶，由尿嘧啶取而代之。

奥尔特云：绕太阳公转的几十亿甚至几万亿颗彗星，最早诞生于原太阳刚刚开始凝聚成形的时期。奥尔特云内部几乎所有彗星的公转轨道半径都比地球轨道半径大几千倍甚至几万倍。

有机物：由碳原子充当重要结构元素的化合物，碳基分子，与生命有关。

氧化：与氧原子结合。暴露在地球大气中的金属生锈就是最典型的氧化过程。

氧：每个原子核包含8个质子的元素，氧同位素的原子核分别拥有7个、8个、9个、10个、11个或12个中子。大部分氧原子核拥有8个中子，质子数和中子数正好相等。

臭氧：由3个氧原子组成的分子，存在于地球大气层高处，能够帮助地球隔绝紫外线。

泛种论：认为生命可能从某地传往别处的假说，比如说，泛种论认

为生命可以在太阳系内的行星间传播。

光子：一种没有质量的电中性基本粒子，能够携带能量。光子束组成的电磁辐射在空间中以299792千米/秒的速度传播。

光合作用：利用可见光或紫外线，以二氧化碳和水为原料制造碳水化合物分子的过程。地球上的大部分生物利用水（H_2O）进行光合作用，但也有一部分生物能用硫化氢（H_2S）取代水，完成光合作用。

行星：绕恒星公转，尺寸不小于冥王星的非恒星天体。冥王星曾是太阳系内最小的行星，但现在我们认为，柯伊伯带的这颗天体实在太小，不能被归类为行星。

小行星体：尺寸远小于行星的天体，可以通过无数次互相撞击形成行星。

板块构造：地球（及其他相似行星）地壳板块的缓慢运动。

原始大气：一颗行星最初的大气层。

原核生物：生命的三个域之一，见“细菌”。

蛋白质：由一条或多条氨基酸链组成的长链分子。

质子：一种带正电的基本粒子，存在于所有原子的原子核内。原子的化学性质由核内质子数决定。

质子循环：三种核聚变反应组成的循环链，大部分恒星通过这个循环过程将质子转化为氦原子核，同时将质能转化为动能。

原行星：处于形成最后阶段的行星。

原行星盘：正在成形的恒星周围的气体和尘埃组成的碟状结构，原行星盘可能孕育出独立的行星。

原恒星：正在形成的恒星。一大团气体尘埃云在自身引力作用下收缩凝聚，形成恒星的雏形。

脉冲星：向外有规律地释放无线电光子脉冲（通常还有能量更高的光子）的天体。快速旋转的中子星周围存在高强度磁场，带电粒子被磁场加速，从而形成脉冲。

量子力学：描述微观尺度下粒子行为的学科，原子结构、原子之间的互动、原子与光子的互动，以及原子核的行为都属于量子力学的研究范围。

类星体（类星射电源）：外观类似恒星，但光谱呈明显红移（因为

它们和银河系之间的距离十分遥远）的天体。

无线电：波长最长、频率最低的光子。

放射性衰变：特定类型的原子核自发转化为其他原子核的过程。

红巨星：度过了主序阶段，核心开始收缩，同时外层膨胀的恒星。恒星核收缩会加快核聚变的速度，提高恒星的亮度，恒星外层将得到更多的能量，从而开始膨胀。

红移：物体光谱趋向于低频长波的偏移，通常由多普勒效应导致。

分辨率：相机、望远镜和显微镜等光学设备捕捉细节的能力。更大的镜头或者镜片通常能带来更高的分辨率，但大气带来的干扰可能让你事倍功半。

核糖核酸（RNA）：一种复杂的大分子，其基本成分和DNA相同。RNA承担着活细胞的许多重邀功能，包括将DNA携带的遗传信息传递到蛋白质合成的地点。

卫星：围绕质量和尺寸都远大于自身的天体公转的相对较小的天体。更准确地说，两个天体围绕它们共同的质心公转，其轨道半径与天体自身质量成反比。

自身引力：物体内部某部分承受的来自其他所有部分的引力。

小麦哲伦云：银河系两个不规则卫星星系中的一个。

太阳系：太阳及围绕它公转的天体，包括行星及其卫星、小行星、流星体、彗星和行星际尘埃。

太阳风：太阳向外释放的粒子，主要是光子和电子。太阳最外层一刻不停地释放太阳风，但太阳耀斑爆发期间的太阳风最为剧烈。

溶剂：能溶解其他物质的液体。溶剂能容许原子和分子漂浮其中，发生互动。

时空统一论：空间和时间的数学统一体，这套理论认为时间和空间完全等效。狭义相对论告诉我们，时空统一论是对自然最准确的描述。所有事件都能用时间和空间坐标来描述，二者之间的差异完全不影响最终表达的结果。

狭义相对论：1905年由爱因斯坦首次提出，这套理论为我们提供了理解空间、时间和运动的全新角度。狭义相对论基于两条“相对性原则”：（1）光速在任何参照系下始终保持恒定；（2）所有静止或匀速运动的参照系都遵循同样的物理定律。后来，这套理论又扩展到了拥有加速度的参照系下，我们称之为“广义相对论”。爱因斯坦提出的这两条

相对性原则完全符合实验结果，以此为基础，他预测了一系列很不寻常的概念，其中包括：

·不存在绝对同步的事件。某个观察者眼中同时发生的两件事在另一个观察者看来可能存在时间差。

·你运动的速度越快，你相对于观察者的时间就流逝得越慢。

·你运动的速度越快，你的质量就会变得更大，飞船发动机加速也越来越困难。

·你运动的速度越快，你的飞船就会变得越短——所有物体都会沿着运动的方向缩短。

·光速下的时间会完全停止，你的长度会变成零，质量则变成无穷大。由于存在这样的局限，爱因斯坦得出结论：你永远不可能达到光速。

＞爱因斯坦的这些预测都得到了实验的精准验证。最完美的例子就是粒子的“半衰期”。经过一段特定长度的时间以后，半数粒子将衰变成另一种粒子。不过，如果将这些粒子放进加速器里，让它们以接近光速的速度运动，它们的半衰期应该会变长，具体数字取决于狭义相对论的计算结果。而且粒子速度越快，加速就越困难，因为它们的有效质量会不断变大。

物种：特定种类的生物，同物种的所有成员拥有相似的解剖学特征，能够交配繁殖。

谱系（光谱）：以频率或波长为尺度描述光子的分布，通常以图像的形式表现特定频率或波长的光子数量。

球体：表面上的每一点与中心距离完全相等的唯一一种立体形态。

旋臂：旋涡星系盘内的螺旋状结构，由最年轻、最炽热、最明亮的恒星勾画出的旋臂的轮廓，点缀其间的是孕育这些恒星的巨型气体尘埃云。

旋涡星系：以恒星、气体和尘埃组成的扁平碟状结构为特征的星系，星系盘内有旋臂。

恒星：大量气体在自身引力作用下聚集形成的天体，恒星中心区域的核聚变反应将质能转化为动能，释放出的热量加热整颗恒星，使恒星表面发光。

星团：同时诞生于同一地点的一组恒星，在相互引力的作用下，星团能维持几十亿年。

强核力：四种基本力之一，永远相互吸引。强核力将核子（质子和中子）结合在一起形成原子核，但它的作用尺度大约只有10^{-13}厘米。

升华：物质从固态直接转变为气态（跳过液态阶段）的过程。

次毫米波：频率和波长介于无线电波和红外线之间的电磁辐射。

超大质量黑洞：质量超过太阳100倍的黑洞。

超新星：核聚变阶段结束后发生爆炸的恒星。爆发的超新星会在短短几周内释放出耀眼的光芒，向外输出的能量堪比整个星系。恒星际空间中比氢和氦更重的元素都来自超新星爆发。

望远镜：天文学家为光谱的每一个部分都设计了专门的望远镜和探测器。某些频率的光根本无法到达地球表面，要想观察宇宙中众多天体释放的伽马射线、X射线、紫外线和红外线，这些望远镜必须安置在地球上空的轨道上才能避开大气层的干扰。这些望远镜的设计各不相同，但它们都遵循三个共同的基本原则：（1）它们捕捉光子；（2）它们聚焦光子；（3）它们能用某种探测器记录光子。

温度：度量一组粒子随机运动平均动能的物理量。绝对（开氏）温标下，气体的温度与气体微粒的平均动能成正比。

热能：物体（无论是固体、液体还是气体）由于原子或分子的振动而拥有的固有能量。

热核过程：高温下与原子核行为有关的所有过程。

热核聚变：核聚变的别称，有时候简称为“聚变”。

嗜热生物：能在接近水的沸点的高温下繁荣滋长的生物。

潮汐：附近的天体作用于可变形物体的引力造成的起伏。天体与可变形物体各个部分的距离并不相同，所以这些部分受到的引力也不完全一样。

不明飞行物（UFO）：出现在地球天空中的难以找到合理解释的飞行物。UFO的流行证明了科学界的无知或者目击者的无知。

紫外辐射：频率和波长介于可见光和X射线之间的光子。

宇宙：通常用于描述存在的一切事物。不过根据现代的理论，我们称之为“宇宙”的这一切可能不过是一个更大的“超宇宙”或者“多宇宙”的一部分。

病毒：核酸和蛋白质分子组成的混合体，只能通过另一种生物的“宿主”细胞完成繁殖。

可见光：频率和波长能被人类双眼感知到的光子，介于红外辐射和紫外辐射之间。

旅行者号：NASA的两艘飞船，分别叫作旅行者1号和旅行者2号。两艘旅行者号飞船于1978年从地球发射升空，几年后它们先后经过了木星和土星；接下来，旅行者2号于1986年与天王星交会，1989年抵达海王星。

波长：连续两个波峰或波谷之间的距离。对光子来说，波长相当于一个光子一次振荡行经的距离。

弱核力：四种基本力之一，只能作用于距离小于10^{-13}厘米的基本粒子。特定基本粒子的衰变就是弱核力造成的。近期研究表明，弱核力和电磁力实际上是同一种电弱力的不同表现形式。

白矮星：将氦聚合为碳原子核的恒星核心。白矮星由碳原子核和电子组成，直径极小（尺寸约等于地球），密度极高（大约相当于水的100万倍）。

威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）：这颗发射于2001年的卫星旨在研究宇宙背景辐射，它的测量精确度比COBE卫星高得多。

X射线：频率大于紫外线但小于伽马射线的光子。

[1] 由于预算严重超支，JWST的发射时间已经推迟到了2021年。——译者注

[2] Dr.Seuss，美国著名儿童绘本作家。——译者注

[3] 2006年，国际天文联合会将冥王星从行星序列排除，将它归为矮行星。——译者注

[4] 截至2012年，天文学家已经发现了冥王星的五颗卫星，但冥卫一卡戎仍是其中最大的一颗。——译者注

[5] 2014年，欧洲南方天文台（ESO）已经实现对系外行星的直接成像观测。——校者注

[6] 2018年，旅行者1号对冥王星进行了飞掠探测。——校者注

[7] 惠更斯号探测器已于2005年1月15日降落在土卫六表面，并成功完成观测任务。——译者注

[8] 均为20世纪50年代美国的著名电视剧。——译者注

[9] 艾略特的这段诗出自《小吉丁》（*Little Gidding*）第五节，此处采用汤永宽译本。——译者注



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的

泛阅读服务



专属社群 独家福利

精品共读 活动特权

手机扫码

加入未读 Club 会员计划

未讀

YOUR ATOMIC SELF

CURT STAGER



诗意的原子

The Invisible Elements That Connect You to Everything Else in the Universe

8种连结你和宇宙万物的无形元素

[美] 科特·施塔格 —— 著　孙亚飞 —— 译

北京联合出版公司

版权信息

诗意的原子

Your Atomic Self

作者：[美]科特·施塔格（ Curt Stager）

译者：孙亚飞

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

版权信息

前言 原子的你

1 生命之火 —— 氧

关键的发现

氧的人体之旅

地球的“呼吸”

人与植物间的氧交换

你的氧诞生于远古的恒星爆炸

氧在空间和时间里的循环

2 原子之舞 —— 氢

绚丽的舞姿——布朗运动的发现

因热而舞

人与环境之间的氢交换

水分子的人体之旅

原子传承的三个案例

氢——生命的始祖

3 创造与毁灭 —— 铁

铁的非凡特性

来自恒星的遗产

蓝皮肤的人

铁与血之间的秘密

关于铁的反思

4 生命之链 —— 碳

没有人是一座孤岛

自然界的流通货币

CO2的穹顶之下

令人震撼的二氧化碳浓度地图

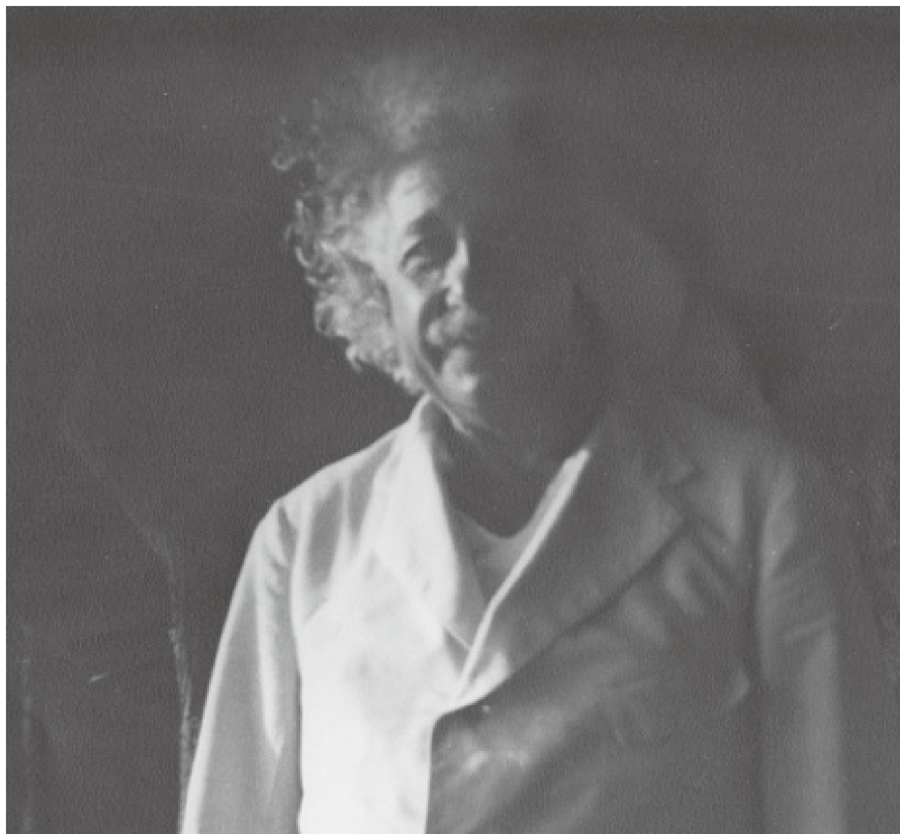
化石燃料是我们深埋在地下的亲戚

用碳13追踪你与世界之间的联系

5 地球之泪 —— 钠

钠为何对动物有神奇的吸引力

钠与氯，几亿年的爱恋
如果你体内的钠消失了……
神经靠钠离子波传递信号
6 生存，毁灭，和来自空气的面包 —— 氮
天空为什么是蓝的
空气中的氮如何转化为我们的肉体
能做面包也能做炸弹
科学天才与战争魔鬼
鲑鱼洄游和氮的食物链轮回之旅
远古人类的食谱
7 骨与石 —— 钙、磷
钙与磷的传奇
你的骨头是活的
你的骨头来自岩石
隐藏在地下的原子交易市场
生命也能创造出矿物
8 增长的极限 —— 磷
蓝藻生长的木桶效应
从撒哈拉到亚马孙的原子迁徙
和身体中的磷来一次面对面的交流
最可能对全球人口形成限制的资源
磷元素会枯竭吗
9 消逝的肉体——生命和非生命的界限
原子的流逝和更新会伴随你的一生
你的一部分原子来自宇宙射线
当你死去时，你的原子会如何
你的死亡并不是原子的终结
任何物质都不会永恒，但你却一直都在
后记 爱因斯坦和他的阿迪朗达克山脉
注释
致谢
返回总目录



阿尔伯特·爱因斯坦在纽约萨拉纳克湖的诺尔伍德船库里。

这是这张照片的首次刊登，它是当地10岁的大卫·比利科普夫用布朗尼相机

于1936年夏天拍摄的

致我们所有人心中的爱因斯坦

很多人不知道，我们犁的土都是星尘，随风四处飘散；而在一杯雨水中，我们饮下了宇宙。

——伊哈布·哈桑（Ihab Hassan，美国文学评论家）

我这辈子用很长时间悟得了一个道理，那就是我们所有的科学在被用于衡量现实时，都是原始而天真的——然而迄今为止这是我们最值得珍惜的财富。

——阿尔伯特·爱因斯坦

比起你的生命传奇，还有什么更有意思的故事？告诉你个好消息，本书所讲的就是这样的故事。

尽管本书经常提及原子，但它们其实只是配角，而你才是真正的主角，它们随你而动，它们随你一同经历成功的狂喜，一同承受失败的悲痛，也一同走过平淡的日常。至于我的角色，那就是试着展现，这些组成你的原子是如何将你和宇宙中一些最神奇的事情联系起来的。

原子会和你一起做些什么？可以说是任何事。无论是你还是你或爱或恨的每一个人，也无论你们何时做过的何种事情，它们都是现场的目击者，更是密切的参与者。你曾经闻到的每一丝气味，看到的每一片景色，欣赏的每一曲旋律，以及唇间发出的每一声哭喊与叹息，皆因那些游走于空气与你身体最深暗角落的原子而产生。当你吃下食物时，其他生物的肉体会变成你身体的一部分；当你受伤时，在一串曾经引爆宇宙中最华丽爆炸的古老原子中，流淌的是垂死恒星的碎片；当你排泄时，

你将闪电与火山的原子回声散播到了全球循环之中，或许有一天它们还会重回你的身体，虽然这听起来让人不悦；而不管何时微笑，你牙齿的光泽中都暗藏着冷战时期太平洋两岸核试后放射尘的余辉。

你不仅由原子构成，你其实就是原子，而本书实际上就是给你自己的一份“原子探险指南”。为了便于用基本的元素术语诠释你的生命，你所需要的不过是了解一些最新的科学信息，以及据此重新认知世界的一些新方法，还有一点活跃的想象力。你会发现，当你这样做了以后，你将体验到一场自我意识的革新，你的思想将在一个更广阔的尺度上驰骋。

在新石器时代，我们学会用岩石与矿物质制造一些粗糙的工具，如今这种文化距离我们已经非常久远，而我们正在步入一个或许可被称为“新新石器”的时代，精密加工的硅芯片、抛光的玻璃，还有高性能显微镜与望远镜所用的合金，这些全新的工具提升了我们的生活，也丰富了我们的感知。借助于这些工具，我们在巨人的肩膀上继续攀登，不断发现更多知识。我们可以摒弃古希腊的“气、水、土、火”四元素概念，取而代之的是更有用的世界观，我们将一百多种原子排入元素周期表中，从中可以看出，传统四元素的前三种并非是基本元素而是化合物，至于火，更只是一个过程而非不可分割的物质。这样的观点也会有助于我们科学严谨地解释我们的肉体、思想、感觉与地球原子之间的隐秘关联。在这个技术、文化与环境快速变迁的年代，明白我们与地球还有其他人之间的紧密联系至关重要。今天已不同于往昔，要想让数十亿地球人及其赖以生存的生态圈变得更好，科学素养才是关键因素。

当然还有很多未知的领域等着我们去发现，未来的研究肯定会推翻很多我们现在确信的事实，或许也包括本书中的一些信息。没有人可以知道一切，就算是最伟大的天才也会犯错。艾萨克·牛顿尚不知道物质与能量可以相互转化，阿尔伯特·爱因斯坦反对量子力学理论，而物理学家欧内斯特·卢瑟福认为在他研究领域以外的科学都只是在“集邮”，也不相信发展核武器或核电站是可行的。即便是“原子”这个词的定义，也在差不多一个世纪前发生了变化。两千年以前，希腊的哲学科学家推断，物质应该是由某种不可分割的微小粒子构成，并将其称之为“a-toms”，意指不可分割的物质。然而严格来说，我们如今称之为“atoms”的原子却

是名不副实，因为核物理学家可以将它们分割成更小的部分。比如位于瑞士的欧洲大型强子对撞机，甚至可以将亚原子粒子粉碎成更小的介子、胶子或轻子。

然而这也并非像有些人宣称的那样，认为一切科学事实的存在都过于短暂，不值得赖其指引真理。诚然，知识的边界是动态的，但科学先驱们已经铺好了很多值得信赖的道路，可以供你行走。比如说，你完全可以确信，原子是真实存在的，它们具有独特的性质，并且它们之间的相互作用方式完全可以被预测；水确实是由氢和氧构成，并且占了你身体的大部分；当然还有，你额头上汗珠中的元素，同样也可以在华丽的彗尾与你脚下的地球脊梁中寻得，在地球上其他生物的体内也一样能够找到。本书正是邀请你游览这样一些值得信任的路径，带你用一种全新的非凡视角看看自己与这个世界，旅程之中将会充满惊奇，但这些都是确然可信的，并且可能会引起变革。

不妨先听我介绍一下你的一颗氧原子。它当然小到看不见，就像一个泡泡，大部分物质漂浮在泡泡中心，从外面看起来就像是一颗没什么特点的乒乓球。但仅仅是中心颗粒或是外层结构中粒子数目的区别，就让不同元素的性质具有显著差异，就好比它们构建的生物体彼此之间也存在着明显的差异一样。

如果你是个身材中等的成年人，那么你的体内携带了将近两千亿亿亿颗这样的氧原子，比任何一片森林中的树叶总数都要多。现在，不妨想象一下从你的大拇指中取出其中一颗，拉近焦距仔细观瞧。

与其他所有原子一样，这颗原子也几乎都是空的。如果将中心由8个带正电的质子与8个电中性的中子构成的原子核放大到树莓（其实看起来两者外观有点相仿）那么大，那么绕着它旋转的带负电荷的电子，距离这颗树莓大约有200码（183米）那么远，接近美式足球场长度的两倍，而电子包围的球体中，有数百万立方码的空间里都空无一物，这体积比新泽西州东卢瑟福的大都会人寿球场还要大上好几倍。这就是科学家为什么会认为你身体中的物质几乎都是虚无的，就像星系间太空深处的真空一样。

不管你感觉自己有多重，原子的空虚都意味着你更像是由原子级聚

苯乙烯构成的多孔泡沫，而不是像看起来那样质地坚实。不过你应该庆幸你的“泡沫”身体，否则的话，你脚下的地球可撑不住你的体重。居于原子中央的那颗微小原子核（希腊人称之为“核心”或“种子”），密度却大得惊人，如果你的体内挤满了“放了气”的而不是膨胀成几近空心的原子，那么只是你的一根脚指头就有接近10亿吨重。

你挑出的氧原子外层有8个电子围绕着原子核旋转。它们可不同于微型的行星被锁定在固定的平面轨道上，而是更为怪异也更为自由地转着圈，同时表现出波与粒子的双重性质，而且它们旋转的速度太快，以至于模糊成一团像云一般的巢状外壳。如果你对这些电子施加能量，它们便会跃迁到更远的轨道上，原子的表面也会随之膨胀；而物理学家还会借助X射线激光将内层电子轰击出来，形成“中空”的原子。

不过从我们的视角来看更为重要的一点是，一个原子的某些电子也可以被其他原子共享形成共价键，从而有助于维持你身体的完整。当两枚氧原子靠得足够近的时候，它们的外壳便会交融，其中一些电子开始同时绕着两个原子核旋转。这种共用电子的方式可以产生千万种化合物，包括你的肌肉纤维和细胞膜，也包括你的荷尔蒙和发丝。

当两个或更多的原子通过这种方式衔接在一起时，分子便形成了。分子（molecule）这个术语源于拉丁语moles，这里的moles可不是指鼹鼠那种毛茸茸的小动物（moles在英语中有“鼹鼠”的意思。——译注），而是指“一堆物质”，一个分子简单来说就是一小堆物质。此刻在你脑海中想象的已不再是孤零零的氧原子，而是分子战队中的一部分了。在你的身体中，它常常与另一枚氧原子如影随形，构成氧气分子游走于你的血管，或是与两枚更小的氢原子形成水分子。

本书的第一章将带你更好地领略这些分子及其原子部件，并揭示它们“如何让你成为你”的一些方式。很多元素都可以在你体内或身边寻找到，但这里只会挑出其中最丰富也是生物学上最重要的十来种详细介绍。这几种元素也将揭开这些原子的面纱，展现它们在你的生命里，还有在将你与世界万物关联起来的过程中所扮演的幕后角色。

当你继续读下去的时候，你将跟随你的原子共同经历一场旅程：穿过风雨，穿过波涛，穿过火海、森林，还有你的指尖。氢原子可以在你

的发梢荡漾，并暴露你曾经居住的故土以及你曾喝过的饮品；你眼泪中的钠，会将你和一片早已干涸的海洋串联起来——而且更诡异的是，还会跟翩翩起舞的飞蛾联系起来；你呼出的碳，会成为玉米秸秆的一部分，进而又进入一头矫健公牛的肌肉中，再后来还可能成为狐狸胡须的一部分；你还会发现，你肌肉中的很多氮原子，是帮助天空变蓝的功臣，而你骨骼中的磷，曾让远古海洋的波浪变绿过；你牙齿中的钙可能是蘑菇从岩石上开采下来的，而你血液中的铁既会杀死细菌也会杀死一颗恒星。你还会发现，你最终会面临的死亡，其实每时每刻死亡都在你的原子间进行着，然而，和其他所有人一样，你也将在宇宙结构的某个角落永存。

用原子观点看待生命颇有点将剧本捧在手心看歌剧的意味。举个例子，如果你不了解意大利人，那么你在观看《唐璜》的时候，也许只会被音乐打动，却对剧情无动于衷。而当你手中有剧本的时候，就可以更好地展现因为信息不足而被眼耳遗漏的故事细节。同样，当你能更好地借助原子观点理解这个世界时，你的阅历也会变得更加丰富。

我们究竟是谁？对这个问题不断的解读算得上是科学给我们的最好礼物之一。尽管我们很容易想象，手机、超市以及城市生活正在将我们跟自然割裂开来，但总有一些事情落后于上个世纪以来的知识与技术大爆发，于是我们的意识仍然联系着自然。我们永远不会真的失去和原子世界的联络，因为不管是否知情，我们都是原子世界的一部分。所以，现阶段我们面临的任务与其说是从肉体上重新构建联系，还不如说是让我们的世界观和迷人的现实之间达成和谐，而这样的现实正是太空望远镜、原子探针显微镜或者是其他复杂的发明最近才向我们展现的。

当我们陶醉于自己是恒星的直系后代这样一个奇迹之时，也许会感到非常震撼，就像乔尼·米歇尔（Joni Mitchell）歌中所唱的那样：“我们是星尘”（we are stardust），是几十亿岁高龄的碳原子。伍德斯托克音乐节（Woodstock）上传唱的这些歌词道出了科学发现的精髓，当然也有些较真的人会强调，我们有些碳原子的历史其实比这更久远，而有些却只是产生于几个星期或几个月前（后文将会详细介绍）。这里主要想说，这样的观察视角不仅颇具美学与哲理意味，对于我们最新书写的这段历史来说，其价值也因为一些现实原因变得越来越大，很多科学家

甚至将当今这个时代称之为“人类世”——属于人类的地质纪年。我们的人口数量惊人，技术强大，生活方式与文化交流也在不断全球化，因此我们如今已是地质学尺度的一股自然力量了。仅仅是我们排放的碳就足以阻止下一场冰川纪，将海平面抬高并淹没海岸，也足以造成所有物种灭亡。今天我们思想与心灵引发的所有行为，都会在周遭环境中产生回音，并将深刻地影响未来。

从这个方面讲，理解我们与地球间的原子联系就不再是一个可以选择的问题而是一种必然。科学是我们看到真理的那一扇最明亮的窗口。生物学家兼作家E.O.威尔森（E.O.Wilson）最近这样写道：“也许是时候停止称其为‘环保主义者’的观点了，搞得好像这是脱离人类活动主流的游说活动一般，而应当称之为现实世界的观点。”不同于我们的祖辈那样只能单纯依赖自己有限的知觉，我们如今可以借助曾经隐藏在事物背后的原子性质，利用这些新的信息更好地阐述我们的知觉所反映的事实，同时也可以期待营造更合理也更可持续的生活方式。

包括卡尔·萨根(Carl Sagan)、尼尔·德格拉斯·泰森(Neil deGrasse Tyson)、布莱恩·考克斯(Brian Cox)、布莱恩·格林(Brian Greene)和加来道雄(Michio Kaku)在内的天才科普工作者已经做了很多工作，向我们介绍了亚原子王国和宏大的宇宙，但是在这两个天壤之别的尺度之间，还是需要用原子的观点来解释。生动的图片与文献可以帮助我们想象微小的夸克与广袤的宇宙，但也可以说很难将它们都带到地球上来。相比于那些利用质谱仪或太空望远镜观测的奇观来说，可以被直接观察的物种和细胞都显得颇为简单，但相比物理学家对质子或脉冲星的预测精度而言，绝大多数生物行为还是更复杂，也更难以被预测——要不然请试着预测一只蝴蝶飞过草地时的路线，或是精确计算某颗正在发芽的种子第一次开花的时间，又或是提前罗列一下你的脑袋明天会迸发的奇思妙想……相比之下，模拟电子或行星的运动，简直就跟小孩过家家那么简单。

本书接下来的篇章将带你游览这座由日常经验构建的趣味乐园，没有艰深的公式，有的只是直觉和感受，还有原子与你自己以及这个世界联系的现实案例。不过既然我们看不到原子，又将如何让它看起来像我们时常假想的那样更为真实呢？

其实简单得很。当你照镜子的时候，你就可以看到在你的面庞中，数不清的原子在向你“眨眼”。为了享受在沙滩上的美好时光，你并不需要去分析每一粒沙子，同样，如果你知道原子总是大量地挤在一起，那么为了感知它们的存在你也不需要对其挨个儿辨别。相反，你可以让值得信赖的专家为你揭开更多的粒子细节，然后利用这些信息丰富你的生活。

不过令人称奇的是，即便是单个原子，如今对我们来说也比过去更易被感知，如果你想亲眼目睹其中一颗的尊容，那么一些最新的科学发现可以帮你实现愿望。德累斯顿理工大学的特里本堡（Triebenburg）实验室建立了一个网站：Electron Microscopy - A Journey into Nano-Cosmos（电子显微”——纳米世界之旅），他们最近公布了一系列对金粒子的显微照片。该系列最后一个镜头定格的照片是一个被放大超过100万倍的照片，显示出金原子就像大理石那样一层层整齐而有序地排列着。

单个原子不仅正在变得可以被看到，而且还能被我们“听”到。瑞典皇家理工学院开展了一项名为“放射性乐队”的在线项目，可以让你借助代表原子放射性衰变频率的特殊声音编写旋律。他们的服务器上存有多种不同音符，分别代表几十种不稳定元素释放的能量，从碳14到钾40不一而足。网站主页对此解释道：“我们的目的是为了启发灵感。我们希望能够提升更多对自然之美的认知，哪怕是最微小的尺度，从而激发人们对于基础科学的兴趣。对我们来说，音乐方面的创造力同样重要……科学与艺术很大程度上都是相通的。我们希望放射性乐队可以强化二者之间的联系。”

撰写本书对我个人而言也是一次探索。即便对于我这样一名研究物种、气候与生命元素内在作用的科学家来说，当我在办公室工作一整天后趴倒在沙发上，或是在树林里散步时，想要把不可见的世界与纷繁的现实联系在一起都不是件简单的事。老实说，将自己想象成一团没有生命的原子，其实是件异常困难的事。我还没有听很多科学家说起过，他们可以从内心实实在在感知自己是由原子构成的，尽管他们的智力水平足以深入讨论这些问题。不过我敢肯定，哪怕你只是飞速浏览了一下这个令人讶异的事实，你都会被永远地改变，而且是变得更好。

虽说我自己对原子的兴趣可以追溯到童年时期，但之于原子，我更深刻的观念转变还是在20世纪70年代的时候。那时我还在读大学，专业是生物与地质学，因为科学课程的需要，当时我正用一种近乎于洁癖的严谨态度，努力地让自己的情感与自然世界保持一致。我那时并未意识到，要想让自己与绚烂的生命共舞，这种严谨必不可少，就像演员或乐师每日的单调训练一样。

1964年，我不记得是谁给了我一张皱巴巴的纸片，上面写了一段从《伽马射线效应》（The Effect of Gamma Rays on Man-in-the-Moon Marigolds）节选的片段——这部作品由剧作家兼科学教师保罗·金代尔（Paul Zindel）于1964年创作，并获得了普利策戏剧奖。不过我永远不会忘记这个片段对我的影响，其内容是一位高中生把她老师刚刚讲的课程复述给她的妹妹——我敢肯定地说，这些话改变了我的人生，直到今天我再读它们的时候，也还是会不禁哽咽。

他让我看着我的手，因为其中一部分来自一颗恒星，在想象力都难以企及的远古年代，它爆炸了……

当生命出现时，也许我的这部分曾经被蕨类植物抛弃，从此被掩埋，直至变成煤炭。

数百万年之后，它变成了一颗钻石——它一定和曾经所属的那颗星球一样美丽……

他说，这些物质非常小——小得不能被看见——但是当这个世界出现时，它们就已经存在。

接着他告诉我，我的这一小部分是原子。而当他写下这个单词之时，我立刻爱上了它。

原子。

Atom。

多么美的词啊！

1 生命之火——氧



“一支蜡烛可以燃烧四个小时、五个小时、六个小时……那么它变成了什么？说来这样的变化也是相当奇妙，产物居然是——所有生活在这个星球表面的植物生长所赖以生存的物质。”

——迈克尔·法拉第

“我下一次呼吸的那口气或许就待在你的肺里。好好给我存着，我还指着它活下去呢。”

——贾罗德·金茨（Jarod Kintz，美国作家）

方便的话，请你先吸一口气……不过反正你也得这么做，因为在过去的24小时里，你已经呼吸了大概3万次了。在你刚出生时，呼吸这项活动就已经自动开始了，每分钟大概40次。现如今，你已经能够用语言来描述这个过程，不过还是会不假思索地呼吸，只是频率降到了初生时的一半。这是一项本能——即使在睡眠中你也在呼吸，如果呼吸停止的时间太久，人就会死亡。

好吧，现在是时候好好思量一下呼吸这件事儿了，请留心一下你是如何收紧膈膜并放松胸腔肌肉的。仅仅这么一个动作消耗的能量大约相当于一个人静息时基础代谢能量的3%，只是为了把体积相当于一个葡萄柚大小的空气吸到肺里，在此过程中，数以万亿计的空气分子就像群鱼入网一样被捕获了。不过，如此巨量的空气分子中，人类所依赖的氧气只占其中的一小部分。平均下来，一位成年人每天需要消耗大约两磅氧气（0.9千克），而单独的一次呼吸完全可以确保延续你接下来几分钟的生命。而且，呼吸也是联结你与地球本身以及这个星球上其他生物的神奇纽带，我们将在后面慢慢聊。

有些人因为需要长时间屏住呼吸，经常会通过呼吸较为纯净的氧气提高自身的氧气储备量。2010年，在瑞士的圣加仑，一位28岁的自由潜水员彼特·克拉特（Peter Colat）在一个水箱中待了长达19分21秒，成为新晋的憋气世界冠军。而就在下水前不久，克拉特吸了几分钟的纯氧，不过这种使血液高度富集氧气的方法只能获得部分竞争优势，因为一旦血红蛋白所携带的氧已经饱和，便很难再将气态的氧气传输到血液中去了。对于克拉特而言，这么做更大的优势是冲洗出肺中的浊气，在他的嘴和鼻子都不能呼吸时，腾空的胸腔便成了一个临时的氧气瓶。

不过，肺并不只是氧气进入血液的唯一通道，你还有很小一部分“呼吸”是通过眼睛完成的。这些氧气粒子极为重要，位于眼球透明的表面的细胞能够直接从大气中吸收它们，用于补偿眼球血管载氧量的不足，你皮肤表面的很多细胞也在做着同样的事情。而波士顿儿童医院的研究者们最近还发现了一种更为直接的血液供氧方式。

有一个小女孩没能及时接上心肺呼吸机，于是遭受了致命的脑损伤，心脏病专家约翰·科尔目睹这一切后，便开始寻求一种绕过肺部而将

氧气直接注射到血液中的治疗方法。为了避免在这个过程中产生气泡而形成致命的栓塞，科尔和他的团队利用声波将纯氧和油脂搅成细腻的白色浮沫。这一方法将气体包裹在柔软而富有弹性的微胶囊中，从而可以在与红血球细胞接触时使其载氧；将这种浮沫注射到实验兔体中时，它们可以停止呼吸15分钟或更久，并不会感到明显不适。“这是一种短期氧气替代法，”科尔在2012年对《每日科学》（Science Daily）的采访者如此说道，“一种能够在关键的几分钟内安全地将氧气注射到病人体内以维持生理机能的方法。”如果这一方法能够完美地应用于人体，它将可能被装备到急救室，当然也可用于憋气大赛。

不过对于我们大多数人而言，呼吸是我们与空气中的氧气之间最基本的联系，而且这个动作如此普遍并连延不断，以致我们浑然不觉——直到我们不能呼吸时才想起此事。到那时，呼吸也明显变得更为珍贵，并成为生命本身的象征。我们会将具有特殊含义的话顺着最后的呼吸一起说出，甚至还会珍藏呼吸本身。亨利·福特（Henry Ford）在他家里将一支充满气体的玻璃试管保存了很多年，据说其中装的是他过世的朋友兼共同发明人托马斯·爱迪生（Thomas Edison）最后一次呼出的气体。根据密歇根州迪尔伯恩市亨利·福特博物馆的资料，在爱迪生临终的床边摆放了好几个这样的敞口试管——试管中的空气与房间里的空气是相通的。爱迪生的儿子查理记录此事时提到：“尽管他被人铭记的最主要成就是在电学领域，但他真正喜欢的却是化学。有这些试管在他临终时陪伴左右并不奇怪，而且具有象征意义。”爱迪生逝世以后，查理将这些试管密封，并将其中一支作为纪念品赠给了福特。

但为什么你要呼吸呢？为什么你这么极度地需要这些看不见的氧气颗粒呢？它们从何处产生，在你体内又做了些什么，离开之后又去了哪里？在你的世界里，空间看似什么也没有，你根本看不到氧气，尽管它们已经在你周围醒目地留下很多存在的证据，从沙沙作响的叶子与猛烈摇晃的船帆到生锈金属与点点烛光。仅仅一两个世纪以前，很多著名的科学家甚至还怀疑过它们的存在。

关键的发现

氧原子几乎潜伏在你日常生活的每一个地方。它们不仅是你呼吸的物质，很大程度上也是构成你身体的物质。科学家们常常会将人类描述为“碳基生命”，但严格按数字来看却不是这样的。

你的体重有大约60%是由水构成，具体数字取决于你的身材、年龄和健康状况；而水分子中8/9的重量属于其中那硕大的氧原子。所以说，氧构成了你湿重的大部分，一个150磅（68千克）的成年人含有大概95磅（43千克）的氧。作为对比，同样的成年人所含的碳大约仅为35磅（15.9千克），如果采用原子比例，那么碳原子的总数相对于氧原子的比例约为1:2。

身体里脱除水分剩下的那部分“干”物质中，氧原子也和其他的一些元素交织在一起，在肌腱的蛋白纤维、肥皂泡状的细胞膜以及螺旋的DNA中都存在。在人体动脉的血糖以及乳汁的乳糖中，氧原子贡献了略高于一半的重量；同时它们还与多数矿物元素共同构成了人体骨骼。如果你体内的氧原子全部消失，你仍然还是可见的，尽管存在不了太久——剩下的元素构成的团雾会随着一股清风飘散得无影无踪。

但这不是你呼吸的原因。你通过喝水吸收了多数水基的氧原子，又通过进食补充了大量碳基的氧原子。呼吸则是件完全不同的事情。这个过程的目标不仅仅是获取氧原子，而是获取由两个氧原子结合在一起具有反应活性的氧气分子。而且不同于喝水或进食，你需要一直持续吸入氧气，因为除了肺部的肺泡，你无法在体内安全地储存氧气。

尽管你可以提纯氧气并将其压缩到体内某个空间存储，但你一定不想这么做。让它们随意留在体内，细胞会受到损伤，而且氧气在浓度过高时是有毒的。你需要在可控的范围内吸入它们，然后立即高效地使用它们，再从身边原子的海洋中吸入新的氧气。

科学家们是如何发现我们与空气间的这种原子级关系的呢？这是一

个跨越数世纪的故事，遭遇了无数死胡同，积累了无数新发现才取得的结果。这里篇幅有限故不能深入讲述这漫长的故事，但可以简要说说18世纪的一些关键发现，至少可以回顾一下获取这些知识有多艰难。当然，有很多研究者都在那个智慧与文化大爆发的时代对此做出了贡献，但特别要说的是其中三名科学家的工作，展示他们通过相对简单却很巧妙的实验所取得的成果。

进入18世纪之前，我们需要先了解两个概念——它们都是17世纪的遗产，一个引人误入歧途，另一个则颇有先见之明。前者是德国炼金术师约翰·贝歇尔（Johann Becher）提出的一个假说，即燃烧仅仅是因为释放了一种被称为“燃素”的神秘物质。后者是英国科学家罗伯特·波义耳（Robert Boyle）的研究，他提出空气并非一种纯净元素而是各种气体的混合物。他在《对空气中隐藏事实的求证》（Suspicions about the Hidden Realities of Air）一书中写道：“我时常怀疑在空气中或许还有更多潜在的特性或能量……因为它不是像很多人想象的那样只是简单又纯净的物质，而是混合物……（并且）可能这世上几乎没多少比它更复杂的非均质体了。”

在18世纪70年代早期，瑞典化学家卡尔·舍勒（Carl Scheele）对氧化汞粉末进行加热并认为由此得到的“火气”在大气中也是存在的，但他没有立即发表这一结论。数年之后，英国化学家约瑟夫·普利斯特里（Joseph Priestley）做了同样的实验并给逸出的气体起名为“脱燃素气”。他在舍勒之前发表了这一发现，并证明在密封的玻璃罐中，这种气体既可以让火焰持续燃烧，也可以让小鼠呼吸。法国化学家安托万·拉瓦锡（Antoine Lavoisier）了解到舍勒与普利斯特里的实验之后，重复了类似的实验，随后称这一发现至少有一部分是他发现的。

不过这几位都不是真正首次在实验中制出氧气的人——炼金术士们早已在一个世纪前制出了氧气，虽然他们并没有完全理解这是一种什么气体。但是，舍勒认识到这种至关重要的气体是空气中的特定成分；普利斯特里论证了它与呼吸和燃烧间的关系；而拉瓦锡给了它一个我们现在正在使用的学名。因为将这种气体与溶液中的氮和硫结合可以产生硝酸和硫酸，因此拉瓦锡将这种气体称之为“oxygène”（源于希腊语，意为“制酸剂”）。拉瓦锡还和其他化学家一起推翻了燃素说。通过对封闭

容器中的锡进行加热，他证明金属在此过程中增重而非减重，并且氧化之后的金属所增加的质量与容器打开时进入其中的空气质量相等。

这几位科学家在各自的生涯里，都热衷于声明自己的权利，而他们的传记中也充满了戏剧性的细节。他们极力争夺，都声称是自己发现了氧气，并且都在后来的岁月里遭遇了巨大不幸。舍勒于1786年逝世，享年仅43岁，可能是因为在实验室摄入了太多的汞、砷和铅。普利斯特里由于持信仰自由的观点并支持美国及法国革命被英国驱逐出境，流亡至宾夕法尼亚时，他又承受了丧妻和幼子夭折之痛，并且在被欧洲科学界孤立的同时又因煽动暴乱而被指控。而拉瓦锡，作为国王最憎恶的税务官之一，在法国大革命期间被送上了断头台。对于此次行刑，数学家约瑟夫-路易斯·拉格朗日（Joseph-Louis Lagrange）写下了那句名言："他们可以转眼之间就砍下他的头颅，但百年里全法国再也长不出这样的一颗头了！"

这些科学家们的发现引领了后来在原子层面的研究，但如果没有高科技设备或科学的训练，原子不可见的特点会致使氧气与火之间的关系很难被认知。就像普利斯特里和贝歇尔那样，燃烧物总重的增加是很容易被忽略的，因为浮力与逸散的废气掩盖了这一点。燃烧1加仑（6磅，2.7千克）汽油，可以向大气中扩散19磅（8.6千克）吸热性气体二氧化碳；而据美国能源信息管理局估算，仅美国的机动车在2012年就排放了15亿吨CO2。这种认知上的局限可能会让我们很难注意到身边环境的变化，而且在探索空气的原子性质时会把我们引入歧途。

两个半世纪以前，在观察了"火气"罐中可轻松呼吸的小鼠之后，普利斯特里自己也试了试这种气体。"我的肺感觉不出与一般空气的区别；不过随后我似乎感觉我的胸腔变得轻松舒适了。谁能说这种纯净空气哪天不会成为一种奢侈的时尚产品？"谁能真的预想到，21世纪，为了通过插在鼻子里的那根塑料管吸取氧气，时髦的现代人每分钟要花上一美元？

最初只是在东京、北京等饱受重度污染困扰的城市出现的"氧吧"，从20世纪90年代开始，在全世界的其他城市流行起来，并且现在还催生了便携式家用制氧机的新市场。支持者们认为这些氧气有消除体内毒

素、强化免疫系统、治疗宿醉以及其他一些神奇的医学功效。不过这其中大部分都没有实验数据支持。在接受WebMD（美国最大的医疗服务网站）采访时，巴尔的摩梅西医学中心的乔治·波伊尔解释道："如果你的肺是健康的，而且也没有呼吸困难，那就说明体内的氧气完全够用。"同时他还说，"对于大部分人而言，（使用制氧机）没什么危害，但也绝对没有科学意义上的好处。"

无论你是在氧吧里买氧气还是吸免费的空气，问题还是那一个：究竟为什么你要呼吸？早期的研究者认为呼吸仅仅是为了降低"体温"，肺无非就是空调而已。而事实的真相埋藏在你身体细胞的深处，在那里，燃烧与呼吸间的区别也将被清楚地揭示。

氧的人体之旅

教科书上常常都会列出一个基本公式："食物与氧气反应生成二氧化碳和水。"试图以此简化从你肺里进进出出的这两种气体之间的联系。"生命之火"这种隐喻很形象，仿佛从原子层面上，将生命的运作方式与真正的火相提并论非常恰当。很多科学家都抱有这样的看法，有时是为了向非专业人士简化概念，有时类似的解释反而会致使他们在事业早期误入歧途。比如，近期《科学》上发表了一篇有关分子生理学的文章，介绍了血糖是如何在氧气的作用下"燃烧"的；大学教授们也经常在课堂上讲到，我们吸入氧气，将其和糖类燃料一起送到细胞这座"熔炉"中焚烧，呼出二氧化碳这种废气。

这种形象的比喻引人入胜，然而却是错误的。近距离观察研究对象就可以了解，为什么火不能完美地解释你使用氧气的过程。

火在很多方面跟生物很相像，两者都会产生二氧化碳以及——说来也有些奇怪——水蒸气。虽然液态水可以浇灭火焰或淹死人，但燃烧时烟雾中的气态水或人体呼吸中存在的气态水却对其来源没有这样的影响。火焰和生命还有一点相像的是，一旦没有了氧气，两者都会因此而终结。蜡烛产生的光和热来自于石蜡分子中化学键的断裂，而你皮肤的温度则与食物中各种分子间化学键的断裂紧密相关。不过，尽管燃烧与呼吸的基本公式如此接近，但是二者的作用过程却有着明显差异。

在蜡烛的火焰中，周边环境里的氧气直接攻击熔融状态的蜡，把电子从一堆灼热的富碳粒子和电离气体组成的燃料分子中撕扯出来。当气态火焰温度、密度、电离达到一定程度的时候，就被称作"等离子态"，例如温度高达6000华氏度（3300摄氏度）氧炔焊的焊接端，该术语也常常用来表示太阳这个炽热球体。等离子态是物质的第四种形态，对固液气这三种我们已经熟知的状态而言，也是一种动态补充，而且很可能是宇宙中物质最主要的可见形式，因为恒星就是由等离子体构成的。在地球上，火焰并没有那么凶猛，只是将碳基燃料分解成与它们的原始状态类似的简单颗粒而已。举个例子，用于制造石蜡的石油，是由捕光性

藻类利用二氧化碳与水合成的；当蜡烛燃烧时，其中的碳原子与氢原子分别和氧原子结合成二氧化碳与水，扩散到大气中。这些原料转化为生物组织时需要吸收太阳能，燃烧时又释放了出来，而且过程飞快，以致蜡烛火焰最热部分的温度可达2500华氏度（1400摄氏度）。

然而，当氧气处在细胞这个可控的范围内时，它便不再是一头怒气冲天的狮子，而更像一只训练有素、嗷嗷待哺的家猫。举例来说，当蜡烛火焰中的高温石蜡开始分解时，氧气猛扑到火焰上，转眼间碳原子和氢原子已经落入了它的魔爪。而当富含碳元素的食物在体内发生氧化时，虽然产生的是相同的废物（CO2和H2O），却是经过两个步骤。当你吸入空气时，氧气不会像从蜡烛里那样捕获碳原子，因为在细胞内部这个相对温和的环境下，氧气转而去专一地捕获氢原子。想想你有多幸运，细胞呼吸产生能量的速度很慢，释放的速度足以保持你的体温而又不会把你灼伤。

要想象这个过程如何开展，可以借用阿尔伯特·爱因斯坦的“思维实验”技术，当你再一次呼吸时，让想象力随着氧气分子滑落到你的喉咙，并进入你的肺。你刚刚吸入的空气中大约有3/4的氮气，除了让你的肺保持膨胀以外，它们对你没有任何作用。你的目标是空气中那由氧气分子构成的21%，但你只能通过在混合物中仔细搜寻来获取，就像从一堆糖豆里用勺子挑出那些颜色你喜欢的那样。

随着你的胸腔扩大且空气被压缩进去，这些气体通过头发丝一般细的支气管挤压到数以亿计的肺泡中，这些泡沫一样的肺泡形成了肺内部粉红色的海绵状结构。它们的表面具有吸附性，全部表面积加起来接近750平方英尺（70平方米），几乎相当于单打网球场面积的1/3。在那里，大多数空气分子被挤进肺泡之间的狭窄空间，那里的毛细血管将它们聚集起来。微观尺度上来看，你的血液就像满是挤满半透明深红色斑点的液体，当肺部搏动时，它们只花不到一秒钟便挤进肺泡中。这些红血球细胞像一辆辆快速移动的车辆，它们可以载着氧气穿过数百英里的血管抵达你身体的任何地方。

与此同时，刚刚在细胞中产生的二氧化碳从血液中逸出并进入到肺泡中。在整个过程中，大部分新吸入的氧气只是简单地又从肺里面被吹

了出来。尽管看起来有些浪费，但这种低效却也有好处。残余的氧气可以在口对口人工呼吸中对无意识的人发挥作用，而不会让他们因为二氧化碳窒息而死。

1品脱（0.47升）的血液大约可以携带0.2品脱（0.094升）的氧气，几乎足以维持人体一分钟的静息状态。不过在这个从肺到细胞然后又返回的旅程里，氧气的含量逐渐下降。当静脉血将气体重新送回肺泡时，跟肺部中的空气相比，其氧气含量几乎可以忽略，而这种不平衡可以驱动更多氧气扩散到血液中。

如果说氧气分子是有目标的话，那么当它们进入你的身体时，最首要的目标就是在你的体内分解。但是如果你想陪着氧气分子一起到你的细胞中走完它的人体之旅，你只能把自己变成一种形而上学的东西。你也不得不这么做，因为很显然，你不可能变成不可压缩的原子后还是你自己，就像一栋由砖盖成的大楼缩减为一块砖后不可能仍然是这栋楼。把原子范围的尺度放大到适应你的尺度同样不适用，因为在这样的奇幻世界里，你周围每样事物的运动速度都会快得离奇。原子只有人体的百亿分之一那么大，所以，氧原子从心脏到双手的旅程就相当于人类尺度下的数百万英里那么远。手臂肱动脉的血液在一秒钟内就可以走完这个旅程，如果放到宏观尺度，原子的运动速度需要超过光速才可能完成同样的事情，而爱因斯坦关于相对论的研究早已说明这不可能发生。

即使忽略这些因缩小和放大带来的逻辑问题，原子领域也比我们熟悉的常规世界要奇怪得多。原子变化很快，并且电子云的外边界不稳定，以至于被观察对象的原子表面并不清晰。这个难以想象的微型世界，不像我们熟悉的宏观尺度——既没有空气可供呼吸，也没有声音可以欣赏，可见光也无法照亮我们要观察的对象。

尽管如此，通过这个思维实验，你还是可以去想象你的所见所感：将一个皮肤细胞放大一百亿倍，将会成为一座三百英尺（90米）高并充满生机的小山，这样你就能更容易地看到氧气在里面是如何发生变化的。在这样的规模下，组成细胞的原子就如同沙粒一般大小，而此时你的身体躺下来的时候则占据巨大的空间，头在纽约，腰身横跨太平洋，而脚却位于澳大利亚。

你现在需要强行钻过一层柔韧的油膜才能进入到这座“细胞山”中。山体内很潮湿——我们暂且接受这个设定，假设你在充满多糖物质的细胞里还能呼吸。山体内的场景看起来极富工业特征，结构蛋白质构成的线缆有手臂那么粗，延伸到四面八方，支撑着细胞外形。

旁边不远处就是你要参观的目的地——一个圆柱形气泡状的物体，差不多有拖拉机车斗那么大。这是线粒体，一座活的能量车间，食物就是它的燃料。你的每一个细胞中可能含有的线粒体数量从几十个到上千个，并且它们形态各异，可能像豆荚也可能像面条。正是在这些线粒体中，你所呼吸的氧气来到了它们命运的终点。

细胞中的酶以及线粒体的核将食物的分子粉碎，形成一堆由大量电子、氢离子以及二氧化碳构成的大杂烩。线粒体核周围是一层软膜，其中嵌有一系列蛋白质，电子便由它们吸收，有一些还会在电子通过时发生抽动、弯曲或者翻滚。正是由于这些分子机器的运转，化学能得以储存，并为肌肉和代谢提供动力。有的时候，这个过程也会帮助身体产生热量。

最后，每一个完成能量转移的电子都完成了最后一跃，从而为后续赶来的电子腾出空间。而这里，就是你对含氧空气有所需求的精确地点。

利用这些跳跃的电子，氧气从粉碎后的食物分子中拴住了氢离子。在这个食物与空气参与的转变过程中，进食与呼吸这两个过程得到的不同成分完成重组，并产生H2O分子，也就是人体中代谢生成的水分。在过去几天中，在吸入的氧气的协助下，你的静脉中有1/10的液体是通过这种方式生成的。因此，空气和水之间的关联比炼金术师们想象的还要紧密，因为它们可以互相展现对方原子的重组。

这，便是你呼吸的原因。你利用空气启动了细胞这台微型机器，又花上一点时间收拾了那些潮湿的废弃物，并通过呼气、流汗等各种方式将它们排到周围环境中。通过这种方式，你将火焰中的碳、氢氧化反应分割成了两个独立过程，从而也显示出“生命之火”这种比喻并不那么恰如其分，更贴切的说法应该是，你每一次吸气，空气都成为了你身体的一部分。

地球的“呼吸”

你每天置身其中并吸入肺部的空气，在不同的时刻和不同的季节都会有变化，其变化幅度超出你的想象。这只是拉尔夫·基林（Ralph Keeling）的众多发现之一，这位斯克里普斯海洋研究所（Scripps Institution of Oceanography）的科学家测试大气的方式和警察用酒精测试仪对司机进行呼吸检测的方式如出一辙。

基林从事氧气含量测量的工作已逾二十年，这些空气样品从夏威夷、南极洲以及其他很多地区收集，并被密封在小瓶中送到他位于加利福尼亚州拉荷亚（La Jolla）的实验室。如同从呼吸中能检测出微量酒精一样，大气中组分的微小变化就可以证明很多问题，比如人类、植被及浮游生物对地球的影响。

森林，我们经常会说它们是“地球之肺”，因为它们制造了我们所需的氧气，但这个比喻在某些方面并不恰当。肺并不会制造氧气，与此相反，它是消耗氧气的器官；并且基林的研究证明，你所呼吸的氧气中只有一半来源于陆生植物，剩下那部分是由海洋中的藻类以及蓝藻（又叫蓝绿藻，蓝细菌）贡献的，此外还有很少的一部分来源于上层大气中水蒸气的分解，太阳以及遥远恒星辐射的放射线为此过程提供了能量。

不过，结合了基林已故父亲——查理·大卫·基林于1958年在夏威夷莫纳罗亚天文台（Mauna Loa Observatory）发布的二氧化碳分析结果来看，长期的氧气记录数据却与医学呼吸检测仪的读数显示出近乎于诡异的相似性。氧气浓度的年度上升波动恰恰伴随着CO2的循环式下降，这些数据共同打开了一扇神奇的窗户，揭示了地球同植物间的原子级关联。

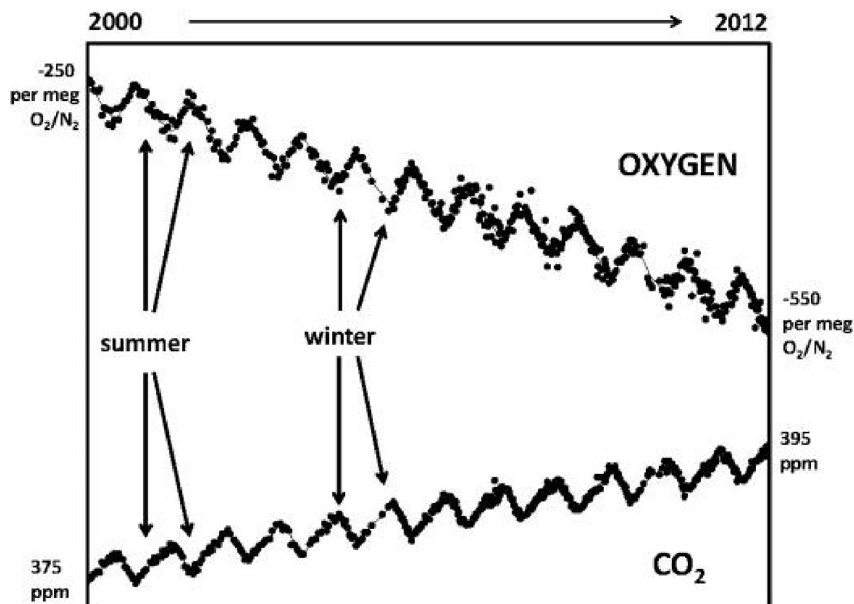
基林最初研究大气时，曾以为不同地区间的差异会比较明显。让他感到惊奇的是，在排除森林与城市影响的偏远地区，采用同种方法收集到的空气样品几乎没有差异。直至今日，大气混匀的程度和速度还是超出科学家的想象，夏威夷与加州拉荷亚市斯克里普斯码头的CO2平均浓

度非常相似。

除此之外，同样值得关注的是，大气记录中还出现了很多类型的节奏性波动。每个白天，二氧化碳的浓度都会缓慢下降，到了晚上又会恢复，而更大规模的季节性波动则是由夏季的波谷与冬季的波峰构成。当拉尔夫·基林继承遗志开始测量氧气浓度时，他得到了类似的曲线，但趋势正好相反。通过这些数据，可以看到，伴随着地球的自转和公转，地球的大气对无数植物和微生物的呼吸做着回应。

促成这一脉动的“起搏器”是太阳。黎明时分，加利福尼亚苏醒过来，拉荷亚的草坪和棕榈树便开始向空气中释放氧气，并从空气中吸取二氧化碳；此时此刻，太平洋海面上漂浮的浮游生物也在做着同样的事情。地球的自转还在继续，直到夜幕降临之时，氧气的生产过程被迫终止，但细胞里那些生产CO_2的小工厂却还在持续运转，因为它们不需要太阳能。从而促使当地的二氧化碳水平重新恢复，而氧气水平相应下降。

类似的过程也体现在因季节更迭引起的大气变化中。春天，万物复苏，芽生叶长，O_2浓度迅速提升，而CO_2有所减少。到了这一年的晚些时日，光合作用变缓，同时枯叶腐烂释放出二氧化碳，于是跟春季相反的变化趋势便发生了。基林的图表揭示了一种锯齿效应，相比于观看，如果你是在倾听这种波动，它听起来好比是长跑运动员的喘息。可见氧气的曲线大概就是：“在春天里努力地呼出，在冬天里深深地吸入。”然后周而复始。



莫纳罗亚火山周边的空气中氧气和二氧化碳浓度在2000年到2012年之间的季节性周期变化与趋势。氧气浓度整体呈下降趋势，主要是因为化石燃料的燃烧和开荒造成的山火与腐烂。感谢斯克里普斯氧气研究项目提供的数据

这里要再一次提起，“地球之肺”的比喻是不太恰当的——不光是说这些“肺”会呼出氧气，而且它们的这一进程还不同步。当一个半球呼气时，另一个半球正在吸气，如果哪位运动员胸腔中那两片肺叶也是如此工作，恐怕会招致不少关注。

基林的记录还清楚地显示出我们人类对大气的影响，不过多数是破坏性的。2013年的早些时日，温室气体二氧化碳的平均浓度达到了400ppm（ppm表示百万分率），相比20世纪50年代时约312ppm的平均值有所增长。引起这一变化的主要原因是化石能源的燃烧，以及砍伐森林引起的腐烂与烧山。不同于光合作用，就跟人类的肺一样，这些现代社会里的人工“肺”消耗的是O2，释放的是CO2，而且这样的行为一直保持着相当大的规模。

当二氧化碳的长期观察记录稳步增长之时，全球平均气温也在同步上升，而氧气的含量却在下降。根据斯克里普斯的O2项目网页显示，拉

荷亚的氧气浓度自1992年至2009年，已经下降了0.03个百分点。拉尔夫·基林在接受《圣地亚哥联合论坛报》（San Diego Union-Tribune）的采访时曾说，这是全球性的“燃烧信号”。

在全球变暖的危机以外，我们现在是否需要担忧氧气被耗尽呢？基林的观点是没有必要。在另一次接受《联合论坛报》采访时，他解释道，空气中的氧气含量是很充足的，微小幅度的损耗并非什么危机。然而，“氧气的变化趋势帮助我们理解，是什么控制了CO2的增长”。斯克里普斯O2项目的报告中提到，自工业革命起，大约有一万亿吨的氧气因燃烧化石能源被消耗，但相对于大气中海量的氧气储备而言，也只是总量的0.1%而已。这个比例对人类的健康影响微乎其微，而在没有不良因素影响的大城市，季节性的氧气水平变化常常可以达到10%或更高的比例。

地球上氧气的储备如此丰沛，以至于全世界所有的植物及浮游生物的年度产出几乎不能对其构成影响。空气中飘浮着1000万亿吨的氧气，大约相当于它们两千年的产出总和。在更为寒冷黑暗的季节以及夜晚时，光合作用不再进行，生命仍然可以找到那些很久以前就产生的氧气而得以生存。

要想从个人的水平理解这一巨大的概念，你或许可以四处走走，接触那些正在维持你生存的氧气制造者。森林研究员大卫·诺瓦克（David Nowak）和他团队出版的《树木栽培与城市林业》（Arboriculture & Urban Forestry）一书讲道，平均1英亩（4047平方米）树林一年生产的氧气足够8个人维持生息，当然精确的换算关系还取决于树种、树龄以及树木生长的环境等。全美国的城市树木每年可以生产出6700万吨氧气，足够维持2/3的美国人生存了。相关报告的城市名单显示，全美氧气生产量的桂冠由郁郁葱葱的佐治亚州城市亚特兰大摘得，这里的树木每年所产生的9.5万吨氧气几乎可供此处所有居民呼吸。纽约市与华盛顿特区分别摘得榜眼与探花，每年分别生产6.1万吨和3.4万吨氧气。新泽西州的费里霍尔德（Freehold）排名垫底，每年的产量只有区区1100吨。

在城市中种树有很多美好的理由，冬暖夏凉也好、美化环境也好，

却没有以生产氧气为目的。即使在寸草不生的沙漠里，你也都能轻松地找到充足而又完美的氧气用于呼吸，对于新泽西的费里霍尔德也一样。而且不管你身在何处，即使在冬季，本地的树木已经落叶或休眠之时，你仍然可以获得足够的氧气。大多数你吸入的氧气分子来自于远方，并且拥有很长的历史，你下一次呼吸的氧气中，也只有很少一部分是在过去一年内生成的。

尽管你或许会很容易展开联想，植物是为了我们的利益才生产了氧气，但事实上，你吸入的氧气，不过是这些光能收集者为自己准备盛宴时不小心撒出来的面包屑而已。植物也和你一样拥有线粒体，它们生产的氧气大多被自己消耗了。无论森林还是海洋所生产的氧气，其实都只是泄漏物，而且大部分在逸出后很快就被锈蚀、腐烂和燃烧等过程消耗了。如果死去的植物、动物和微生物不是在腐烂或焚烧前就大量被土壤和海洋沉积物掩埋，那么大气中的氧气含量最终会降到接近于零的水平，所有人都会窒息。

你的另一个氧气来源或许可以通过从海水中拉起一张细眼渔网而找到，如果捕获物接近于棕黄色，那么你可能收集到了硅藻。在显微镜下，它们看上去就像是一块块包裹着玻璃外壳的金色果冻，看上去有的像雪花，有的像针头，有的则像是精心设计的轮毂罩。其他一些可以发生光合作用的浮游生物，通常具有奶油状白垩外壳或是像一串绿色的孔雀石珠子。海带则类似植物的近亲，其外形可以像是绿色的膜，或是一张棕色的软质橡胶垫，又或是起皱的莴苣。拉尔夫·基林测算，每年北半球海洋生物通过光合作用产生的氧气接近300亿吨，南半球还要多出一半。

如果你穿过大气来到高空，或许氧气短缺会成为问题。重力作用使得气体分子在低海拔的位置聚集，在海平面上，每平方英寸的气压大约是15磅（1标准大气压 = 14.696磅/英寸2 = 101.325千帕）。这个压力不会让你感到不适，因为在你的体内到处都分布着空气，内部压力与外部压力刚好匹配。这种感受更像是在游泳池中漂浮，而不是在头和肩膀上顶了一只重达3/4吨的水球。如果不是坐飞机或是在高山上行进时耳朵有些不适，我们大多数人甚至都不会注意到这股始终存在的压力。

根据altitude.org提供的在线气压计，在一座海拔1英里（1.6千米）的山峰上，你仍然可以获取相当于海拔零点处83%的氧气；然而当你爬到1.5英里（2.4千米）左右时，空气变得更稀薄，氧气浓度也降到了75%以下，高原反应便可能成为实际麻烦了。人们有时会在高空飞行的航班中感到头痛，很多时候就是因为舱内低压导致的轻微缺氧，这种情况与身处海拔1.5英里高的山上类似。

有些人群的祖先在高海拔地区生活了数百年，由此可能形成基因突变，从而使他们更能适应缺氧状态。多数西藏人都比其他人群的呼吸速度更快，并且每一次呼吸可以吸入更多的空气，这便是因为基因遗传让他们能更好地适应氧气短缺的情况。安第斯人的血液中存在大量的变异红血球，具备从空气中提取更多的氧气的能力。



肉眼观察空气压力。左图：一只塑料瓶在秘鲁安第斯山脉海拔 15500 英尺（4724 米）的高度上封紧瓶盖，这里每一次呼吸中的空气分子都只有在海平面呼吸时的一半。右图：同一只瓶子未经启封带到接近海平面高度的利马，更稠密的空气分子产生的压力将瓶子挤压变形。照片由科特 · 施塔格拍摄

但是即便是这些拥有特殊基因的人群，长期在世界最高峰生存也是不可能的。很简单，我们与那些具备光合作用的生物之间存在着原子级的关系，而这个关系不能太过遥远。

人与植物间的氧交换

严谨的研究证明，我们呼吸是为了从空气中获取氧气，并将其转化为水，因而这种对氧气的需求多多少少将我们和植物串联了起来。但是，这就一定是植物与人类之间的重要关联吗？为了追踪更多细节，我们需要更多地关注氧原子而非氧气分子。

想象一下你和身边一盆植物之间的原子级关系。如果你和你的植物在一间明亮的房间里一起生活几个小时，你便可以玩一个“在不同分子形式中获取特定氧原子”的游戏了。为了进行这个异想天开的思维游戏，你不能使用你呼出的CO_2，因为植物会将它转变为自己的一部分，从而使得要想重新收回你呼出CO_2时所释放的氧原子，最主要的手段便只能是吃掉这棵植物。

相反，如果你吸入一个由这棵植物释放出的氧气分子，你的细胞会将其转变为代谢水。这时，氧原子就从氧气分子中分离了出来，并“变相”成了H_2O，或许通过你的呼吸逃逸出来，并以水蒸气的形式随着空气飘到了植物旁边。如果这个水分子进入到叶片中，它会被光合作用分解，氧原子获得自由，再次参与构成一个新的氧气分子，其中那颗随着水汽被你呼出去的氧原子，又重新回到了你体内。

在舍勒、普利斯特里和拉瓦锡之后的很多科学家继续进行研究，得益于这些发现，你的想象力可以插上知识的翅膀，去跟踪植物的这个交换过程直至细胞层面。帮助植物将水转变成氧气的细胞器是叶绿体，从大小和形状上看，它都很像线粒体，但内部挤满了多层的膜，就像是千层饼。当阳光照射到叶子上时，那些固定在叶绿体膜上的翡翠色分子也会受到一部分阳光的刺激。这些被阳光照射的叶绿素，反过来又会对其他分子机器发射电子，并帮助推动糖的合成，之后这些糖将形成树液、茎、花和种子。

但此处还有一个问题——叶绿体在“发射”后还必须重新“装弹”。在叶片中，水分子是最方便的电子来源，而叶绿素则非常擅长从水分子中

获取电子并释放氧原子。游离的氧原子于是重新组合成气体分子，可以被邻近的线粒体直接消耗，也可以逸散到空气中，或许最终就会造访你的肺。

阳光在地球表面的投射范围巨大，因此每一天都可以激发大量光合作用。如果水分子能再大一些，你或许都能听到它们像鞭炮一样爆裂的声音，因为靠太阳能生活的植物会将它们打碎，并将这些分子“弹片”喷射到空气和海洋中。在这一混乱过程中生成的氧气面临许多可能的命运，但无论是融入了锈斑中、闪电中，还是你指尖的细胞中，它们最后都会以毁灭告终。

但是如果氧气分子也有意识的话，它们一定会很乐意迈开步伐去做这些事。在一个充满生命的星球上，任何一个分子的消亡都是不可避免的，在历史长河中也是无关紧要的。根据理论推测，按目前全球氧气的生产速率，大约需要几百万年就可以将海洋里的每一个水分子分解一遍，而在汉斯·莫尔（Hans Mohr）和彼得·朔普费尔（Peter Schopfer）合著的《植物生理学》（Plant Physiology）中他们曾测算，自4亿年前陆生植物进化出森林以来，它们的光合作用就相当于将所有地表水分解了60遍。

从地质学的角度来讲，你所使用的大多数水和氧气都是比较年轻的，它们的年龄普遍只有几个世纪或数千年，而非数百万年。因此，尽管我们和恐龙呼吸同样的空气、喝同样的水的想法很酷，但在很大程度上这并非事实。

另一方面，构成这些氧气与水的原子的历史就要悠久多了，它们不仅将你跟大气、海洋和地球上的其他生物相联系——你的原子还可以连接到更远的空间与更久的时间。

你的氧诞生于远古的恒星爆炸

如果你可以检测舌尖上分泌的一个单个水分子，或许你能发现宇宙两个不同历史阶段留存下的遗迹。138亿年前，在宇宙大爆炸发生后不久，属于你的那些氢原子就在亚原子颗粒的云团中凝聚出来了。但氧原子还完全没有出现，因为氧原子需要在恒星中形成，而此时第一颗恒星都还没“出生”。你体内的那些氧原子比氢原子要年轻几百万岁，甚至几十亿岁。

当原始的氢原子聚集成团簇，并变得足够庞大、密度足够高、温度足够热，足以引发核聚变反应——第一代恒星就被点燃了。太阳核心的温度高达数千万度，其能量也是来自类似的反应。在那团无比灿烂的等离子体中，电子脱离原子核的束缚，失去电子的原子核直接轰击了其他没有电子云保护的原子核。如此猛烈的撞击使得带正电荷的质子克服了相互之间的斥力，用更强大的核力（强作用力）把它们结合在了一起。新形成的结合体是氦原子（Helium）的原子核，一个以希腊太阳神赫利俄斯（Helios）命名的元素。太阳能够在9300万英里（1.5亿千米）以外促成地球上全部的光合作用，能够让你躺在沙滩上晒日光浴，靠的都是核聚变产生的巨大能量。

然而，你体内的氧原子诞生于更大的恒星中，这样的恒星可以使氢原子聚变成更重的元素。在水分子中，氢原子依附于占绝大部分质量的氧原子，但形成氧元素的核子曾经与更轻盈也更古老的氢原子是完全相同的。当超巨星逐渐衰老并死亡时，新形成的氧原子就像花粉一样，从这朵明亮的火焰之花上飘落，飘散到了太空中。对夜空的观察好比是在游览一座花园，组成生命的各种元素在花园中渐渐成熟，而你的身体就是恒星花园收获的果实组成的复合体。纵观整个历史，人们常会说太阳为父大地为母，或许反映着传统性别角色的主流观点。但从原子层面上说，更精确的阐述应该是，地球和太阳都是我们的兄弟姐妹，因为形成它们的恒星残骸，其成分和我们体内的元素一模一样。从某种意义上讲，地球确实是我们的代孕母亲，因为我们的身体起源于它，但我们如

今能够存在，根本上还是因为那些已经死去很久的恒星生母，愿你呼吸的下一口新鲜空气是献给它们的追忆。

氧在空间和时间里的循环

从太空中看，地球就如同一颗淡蓝色的珠子——这一形象是美国航空航天局（NASA）太空计划做出的最重要的贡献之一（指NASA拍摄了第一张地球太空照片）。尽管这颗行星上原子数量非常庞大，但终究还是有限的。如果看一看云层掠过地球表面的卫星视频，你会发现，那些拽着云层划过弧形地平线的风，或许片刻就会出现在相反方向的地平线上：这很形象地印证了那句老话“What goes around comes around”的字面意思（这句英文谚语的含义为：种什么因，得什么果）。

当从很远的距离观察时，天空就好像是一层极薄的薄膜，其中的大多数分子都被挤在仅有10英里（16千米）厚的薄层中，而地球的直径却有将近8000英里（1.27万千米）。在海拔零点处1立方码（0.76立方米）的空间里，含有数以兆亿计的原子，但仅仅在一层雾状的“皮肤”以外，便是太阳系中的相对真空，在这里如果你要尝试呼吸的话——当然不会成功——你的肺每次只能吸入可怜的几粒原子。当你将来再看到从太空拍摄的地球照片时，最好试着说服自己，那些无处不在且不断喷出污染物的烟囱，并不会将有害物散播到空气中，而这宝贵的空气正供养着你和你的爱人。

基林和他的同事史蒂芬·谢茨（Stephen Shertz）揭示，植物和各类浮游生物产生的氧气，会在两个月内遍布半个地球，而遍布整个地球也只需一年多一点的时间。大气中氧气与二氧化碳的平衡与生物活动之间的敏感性表明，这种循环并非只是短暂趋势，而是这个星球上所有生物在原子层面上一直都在践行的传统。

我第一次被这种思路打动时，还是在20世纪60年代初，当时我本该做家庭作业，实际上却是在看一本漫画。我已经记不起那个故事的标题和主要内容了，但其中一幅图却一直萦绕在脑海中。图中有一位满头华发的发明家，屈身坐在工作台旁，文字旁白的大致意思是：“你现在呼吸的一部分空气分子，也是列奥纳多·达·芬奇曾呼吸过的。”

当时我还是个孩子，很难完全理解那篇故事的立意，甚至不知道为什么列奥纳多会是主角。难道是因为他比我们大多数人呼吸更多空气吗？不过很多年以后，当我知道列奥纳多是众多历史人物（包括尤里乌斯·恺撒、耶稣、莎士比亚和希特勒）中唯一一个经常阐述呼吸循环的人时，我才感受到了这个观点的迷人之处。从网络上对这个话题的点击数来看，很多人也跟我有一样的感受。

你必须谨慎挑选一些事实和数据才能得出一个结果，然而多数数据来源报告都显示，你每一次的呼吸中，有1到15个原子是提出问题的那个人（达·芬奇）曾经呼吸过的。为了继续这个研究，首先一个必要的数据就是大气的总质量，也就是由凯文·特伦伯斯（Kevin Trenberth）和莱斯利·史密斯（Lesley Smith）在2005年估算的5000万亿吨，他们两位都在位于科罗拉多州波德（Boulder）的国家大气研究中心工作。这也就意味着一共有大约1044（这个数字大到难以想象）个原子存在于空气中，其中1/5是氧原子。

如果再考虑与海洋之间的气体交换、肺部的平均体积以及人类的平均呼吸频率等，你每次的呼吸也就很可能接近1到15个“列奥纳多原子”这一范围，从而得出同样的基本结论：同一个世界，同一个大气。不过要想让你的计算结果更加精确，你还需要挑选更合适的气体才行。

举例来说，1到15的估算结果并不适用于氧气，因为这种气体不够稳定，不会在空气中存在这么久。细胞、森林大火、闪电以及太空辐射迟早都会将其撕碎，并转化为水或其他化合物。在一部拥挤的电梯里，你不得不和你的同伴共享一部分氧气分子，你的肺不会将吸入的氧气用尽，剩余的那部分会在人与人之间继续传递。但是放大到行星尺度，你和列奥纳多或更久远的历史人物共享氧气分子的概率接近于零。你所呼吸的大多数氧气都还不会如此长寿。而尽管氮气更为充足，也更为稳定，不过也会通过食物链完成循环，然后再回到大气中。

更有助于用来解释空气循环的气体应该是不会被生物体产生或消耗的。美国天文学家哈罗·沙普利（Harlow Shapley）采用氩气作为计算对象，这也是被广为采用的选择。

氩气在大气中广泛存在，尽管它只在总量中占了不到1%。比例小其

实也不坏，呼吸高浓度的氩气可不是什么好主意。氩气比大多数气体密度更大，所以一旦吸入，再将其从肺部呼出也会更困难些。工业事故中氩气导致的窒息比有毒气体如氯气造成的死亡还要常见。不过1%的比例不值得过于担忧，而对于沙普利的思维实验来说，这一点却使氩气成为便捷的示踪气体，从而得出高度精确的估算结果，也就是每一次呼吸中，大约有15个氩原子是曾经被某人如列奥纳多呼吸过的。

在他1967年发表的《呼吸过去与未来》（Breathing the Future and the Past）一文中，生动描述了每次呼吸中的氩原子，我忍不住要在此处引用：

我们不妨叫它“X呼吸”。它迅速蔓延。其中的氩气，清晨时分刚刚呼出，黄昏时分却已飘散到四邻。一周过去，它已经遍布整个国家；一个月过去，它已占领风可到达的所有角落。到年底时……（它）将会在这个星球上所有自由的空气中均匀分布。而此刻，你也将会再次呼吸到同一个原子……

重新呼吸到那些曾被呼吸过的氩原子，无论来自于你自己还是其他人，都有着别致的暗示作用。这些氩原子，用一种空气式的结合，将我们的过去和未来紧紧相连……这是一个气体银行，你向其贡献了很多氩原子，我们也都会从中再提取，地球上每一个婴儿出生后的第一次呼吸中，都包含着你一年前曾经呼吸过的氩原子。而这也是一个残酷的事实，因为你也向每个垂死之人的最后一次呼吸贡献了部分氩原子。

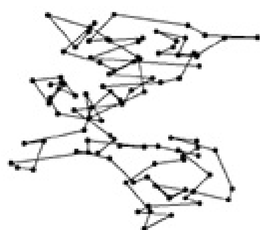
早些年间的每一位圣人和每一位罪人，每一位普通人和每一头野兽，都将氩原子投入到这所公用的气体银行中……这里的氩原子来自于最后一次晚餐的谈话，来自于雅尔塔会议的辩论，也来自于那些经典诗人的朗诵……我们接下来的呼吸，也许就来自于历史上甚至史前的鼻息、叹息、咆哮、尖叫、欢呼，或是祷告。

沙普利不是诗人，也不是神秘论者，他的学院精神是无可挑剔的。他在普林斯顿大学修读天文学，并协助建立了国家科学基金，担任过哈佛天文台的负责人，计算出了银河系的尺度。不过我并未因为他散文雄辩的表达感到惊讶，也未曾因为其中散发出的哲理和灵性感到一丝震惊。强烈的情绪暗流往往会在科学揭示的事实和数据之中悄然流露，同

样如果科学发现真正伟大时，它们也会释放深刻的见解和情感。

即使亨利·福特这样的聪明人也没有意识到，他其实没有必要用试管去俘获爱迪生最后一次气息的原子。你可以在任何时候收集样品——顺便也可以收集恺撒、耶稣、莎士比亚、希特勒和列奥纳多最后一次呼吸的样品——甚至其中也有少部分是你出生时第一次啼哭时呼出的空气。

在这充满原子的蓝色星球上，呼吸这事做起来实在太简单了。方便的话，先吸一口气吧。



原子都在跳舞……所有空气中的原子，还有沙漠中的原子，只要我们知道的，都像疯子一般在跳舞。

——鲁米（Rumi，波斯诗人）

如果这个星球上有魔法，那一定存在于水中。

——洛伦·艾斯利

（Loren Eiseley，美国人类学家、哲学家和自然科学作家）

当你穿过一座桥的时候，你会惊叹于那些坚固的吊索，却会忽略那些让你（或它们）不会滑落的螺栓。沙拉里的一粒沙砾藏在那些绵软的食物里，却会在嘴里引起你更多的注意。如果你已经饥渴难耐，那么一杯白开水也是甘露。生命中，最简单的东西有时却意味着不可或缺。这句话对你身体里的基本原子构成也是适用的，没有它们，你也就不存在了。而这其中，最基本的元素莫过于是氢了。

氢原子的结构最为简单，只有一个质子和一个电子，剩下的绝大部分空间都是空空荡荡——跟所有原子一样。但你要知道，对于你和这个世界而言，这个最朴素的原子却极为重要。没有氢，水也就不再存在（氢的英语“Hydro-gen”意思就是水由氢和氧生成），因此全世界的海洋、云层和极地冰盖，以及你身体里60%的物质都将消失。你的肌肉会解离成没有用的碳纤维缠绕在一起，骨骼会崩溃，细胞则会因为没有细胞膜的保护而融化。而这些都会在一个异常黑暗的世界里发生，因为太阳和恒星也都会消失不见。然而你对氢的需求其实还有更多，并且氢也是其他生命元素的祖先。

我的一个朋友常说：“给氢元素足够的时间，就会变成人。”从长远的角度来看，这句断言是正确的。氢是在宇宙大爆炸后不久最先产生的元素，并引燃了最初的恒星，所以氢是你身体中最古老的原子形式，在宇宙中其他地方也是如此。氧原子，实际上可以追溯到氢原子核在次生代恒星上发生的氢核聚变。它们“骑在”氧原子上形成水分子，在辈分上它们却是氧的叔叔或婶婶。

不过我朋友的这个说法在另一个更直接的角度而言也是正确的。上万亿的氢原子正在支撑着你，还有很多放弃成为水蒸气分子，而紧紧偎依在你头发的原子骨架上。类似的关联还发生在沙漠鸟类的翅膀与仙人掌之间，在大象尾巴上的毛与雨滴之间，在古代木乃伊的头发与当地的饮用水之间。我们很快就将看到这一切是如何发生的，不过首先你应该知道被我们称为水分子的原子三人组的其他轶事。你会说它们是在跳舞。

绚丽的舞姿——布朗运动的发现

1827年的夏天，苏格兰植物学家罗伯特·布朗（Robert　Brown）从一些紫色的克拉花（Clarkia　pulchella）的花心中采下花粉，并与水滴进行混合。通过他的黄铜显微镜观察，布朗注意到了很奇怪的事情。在他的镜头下，细碎的花粉涂片漂浮在湿润的介质上，看起来似乎正在颤抖。

布朗很自然地认为，这种振动是花粉自身产生的。他在笔记本上写下："不是由水流产生，也不是由缓慢蒸发产生，而是源于颗粒自身。"和他那个时代的很多科学家一样，他深受古希腊哲学—科学家们的影响，确信有机体中存在着一种神奇的力量，可以形成生命。或许他眼前看到的，实际上就正是生命的本质！

不过作为一位严谨的科学家，布朗为了验证他的猜想，还试验了其他一些花粉和孢子，用"绚丽的动作"一词记录了碎屑的振动。然而令他吃惊的是，在悬浮液中，没有生命的物质和生物样品一样，也会出现颤抖——石棉纤维、金属粉末，甚至来自斯芬克斯像的石头碎屑样品，都是如此。这些样品通常来讲都不具备神奇的生命力量，只是都有液体围绕着它们而已。

我们现在都已经知道这些运动确实是由微粒所引起的，但这些微粒比起布朗通过简易显微镜看到的那些颗粒可要小上数千倍。为了跟上当时的时尚，他将这些振动的微粒称之为"分子"，因为"分子"一词从字面上翻译就是"很小的东西"，所以他命名的术语从技术上说是很精确的。然而，他真正看到的其实是不可见的水分子对那些悬浮颗粒的猛烈冲击。从某种意义上讲，他也看到了自己。在我们所有人的身体里，正是因为分子的这种"动荡"，才让我们能够活着，就像传说中那神奇的力量一般。

这种运动在亚显微镜的尺度下发生，因此罗伯特·布朗的设备并未达到真正的观察深度。他所观察的颗粒几乎是不可见的，可能也就是直径

1微米左右，或者说是指甲厚度的千分之一。动荡的水分子比起这些来，还要小上几万倍，甚至比光的波长还要小——而光线是让我们能看到事物的原因。如今，比光学显微镜更为强大的电子显微镜给分子和原子制作了生动的图片，但并非是真正意义上的照片，因为这已经超出“可见”的正常范围了。它们只是窥探了分子或原子的位置和形状，就像一个读取黑胶唱片凹槽的留声机针头一样。但是尺度小并非是分子和原子难以被观察的唯一原因，还有一个重要问题是它们并非是想象中那样静止不动。

在2013年，IBM的一个研究团队为了拍摄单一分子的首张“定格电影”，不得不将样品冷冻到零下450华氏度（零下268摄氏度），从而使被观察对象的运动慢到足够可以被操控。这部名为《一个男孩和他的原子》（A Boy and His Atom）的电影现已被《吉尼斯世界纪录》收录为全世界最小的定格电影，其情节是珠状的一氧化碳分子排列成简笔画的人物形象，其中一个分子充当了玩具。聚焦如此清晰的图案是绝不可能在室温条件下拍摄出来的，因为持续抖动的分子会以接近每小时1000英里（1609千米）的速度逃离出视野。

自由运动的分子和原子具有超凡的速度，以至于它们会多次极速地冲撞那些同样精力充沛的邻居。在海平面高度下，室温条件的一个氧气分子在一秒内会被它的同伴撞击超过十亿次；如果你能让你的手在看似平静的空气中保持绝对静止1秒钟，它将会遭受超过1024次这样的冲击。你周遭的空间看起来空无一物，实际上却充满着这些横冲直撞的分子，如果它们多到可以让你清晰看到时，你也许会因为吸入或穿过它们而感到反胃。不过即便是你自己，也不可能做到保持静止，因为你身体内的原子和分子仍然会疯狂地互相冲撞，或是拉拽束缚它们的化学键。

大量分子包围着罗伯特·布朗的样品，不断从各个方向撞击着这个“庞然大物”，以此宣示它们的存在。由于分子数目的微量差异，颗粒在不同方向所受的力并不均匀，从而产生了随机运动，就好像沙滩球被跳舞的密集人群顶开时表现出的反弹一样。

布朗并非是发现这一运动的第一人，尽管这已被公认是他名下的贡献。“布朗运动”这一术语主要用来描述微粒的运动，但实际也反映出更

普遍的现象，即所有原子和分子的热运动。如果你曾看到过阳光下光柱中的尘埃闪烁不定，说明你已经见过类似运动了。悬浮颗粒和碎屑被大量不可见的空气分子推搡，闪光正是源自它们对光的反射。

两千年前，罗马诗人卢克莱修（Lucretius）曾推断过这种尘埃运动的原因，在古典主义学者约翰·塞尔比·沃森（John Selby Watson）翻译的其著作《原子之舞》（The Dance of Atoms）中，卢克莱修如此解释："这种无序意味着，物质规律中尚存在着某种隐秘的运动趋势，尽管对我们的感官而言是潜在而不可见的……这种运动源于（原子），并随着温度上升而扩散，以至于被我们所感知。"

卢克莱修和其他一些早期的哲学—科学家思考了世间万物的原子本质，尽管没有任何办法证实他们的直觉。有时，想象力也会将他们带入歧途，例如，卢克莱修曾描述原子是"彻头彻尾的固体"。不过斯蒂芬·格林布拉特（Stephen Greenblatt）在《大转向》（The Swerve）这部有关卢克莱修的书中解释道，早期的这些原子论者在思考类似的问题时，想的不仅仅是定量物理学。

根据格林布拉特的观点，现实中的原子性质影响着我们每个人生命中最内在的本质：

如果你能持续对自己复述万物存在的最简单的事实——只有原子和虚无，只有原子和虚无……你的生命将会改变。当你听到雷鸣时，你不再惧怕朱庇特的愤怒，当流感爆发之时，也不再怀疑是否有人冒犯了阿波罗。

在如今这个核能与纳米技术纵横的时代，很难相信我们对原子掌握的这些细节是很新的知识，然而，在科技界完全接受原子真实性之前出生的很多人如今仍然健在。一直到1803年，才由英国化学家约翰·道尔顿（John Dalton）提出了正式的原子论，而直到1905年，才由阿尔伯特·爱因斯坦通过对布朗运动进行数学分析，论证了分子与原子的存在。

当代的专家们可以很常规地去研究特定的原子以及它们在分子结构中的排布。但是对于缺乏必要设备的我们来说，原子存在这一事实对我们的震撼程度跟卢克莱修时代是一样的。

因热而舞

在原子尺度，所有颗粒都一直在运动。即便在最平静的水池或是最坚硬的冰山中，原子也一直在颤抖，不是因为冷而是因为热。物质普遍存在的这种热运动，是最没有规律可言的运动之一。这与真实世界中的随机性非常接近，实际上，数学家们用于驱动随机数生成器的方程便是基于此原理开发而来的。

布朗运动与真实舞蹈之间的相似性并不只是巧合。康奈尔大学的物理学家们，通过对某次摇滚音乐会视频中一群舞者的详细研究，发表了一篇题为《重金属音乐会中狂舞者的集体运动》（Collective Motion of Moshers at Heavy Metal Concerts）的论文。他们发现，无序的气体状态，如果按比例缩放到二维的舞池，可以很好地描述这一活动。对此他们写道："这一发现为狂舞与气体之间的相似性提供了强有力的支持。"该论文发表于2013年2月11日，由arXive.org收录，虽然看上去有些搞笑，但这背后的科学性对于群体行为动态分析研究来说，却是具有预测价值的。

当然，真正的舞蹈都是有目的性的，而原子却没有心脏、大脑或脚去实现什么目的。但是通过两者之间的类比，用以说明原子躁动不安的运动方式，也可以帮助我们来阐明真实世界的现象，例如温度。

当温度与热的概念到了原子层面时，就不会像你预料的那样了。在这个范畴中，"热"是一种粒子之间相互碰撞传递的能量。热量越多，粒子碰撞的活跃度就越高。很多布朗同时代的人都相信，热量是某种很像生命力的力量，但可以适用于所有物质。这种背景能量存在于所有存在原子的地方，并且所有原子因之而舞蹈。即便原子被严格限制在石英晶体或一块骨头中，它们也像坐在座位上感受摇滚乐节奏的观众一样躁动。

另一方面，温度也是一种热效应。当不断增加的热量加速了汞原子的振动时，汞原子之间相互撞击太强烈，就被迫需要扩张，因此水银温

度计中的温度和汞平面都上升了。拥挤的舞池也是差不多的状况。人们在静止站立时可以紧紧地靠在一起，但音乐响起的时候，他们就会开始推倚对方，每个人都自动扩张了地盘。被观察对象的温度，其实就是反映了其内部粒子舞蹈的活跃度，因热而膨胀的气体也解释了，为什么热空气会上升以及驱动风和其他天气现象形成的动力学原因。

康奈尔大学的研究还指出，温度方程同样也适用于舞池。研究者利用计算机技术模拟了一支紧密排列的“移动活跃性模拟机器人”舞蹈队，通过模仿一群密集的热舞者和其周围的旁观者，研究了其互相碰撞时的动能损耗。“通过对电脑模拟的舞者的运动进行测量，建立了一个径向温度梯度（物体由里向外或由外向里产生的温度差异），”他们如此写道，“计算机模拟的舞池，中心位置温度更高，而边缘温度则相对较低。”

简而言之，对于你来说，原子这种因热而驱动的舞蹈在原子层面上维系着你的呼吸与生存。依赖这种热运动，氧气从你的肺里扩散到血液中，信号分子钻过神经细胞与肌肉细胞之间的狭窄缝隙，告诉你该收回那只快要被烫伤的手了。如果你在冬日里摘下手套并抓住某人被冻得冰凉的手，你身体上那些碰撞更激烈的原子会“鼓舞”对方那些缓慢的原子，与此同时，一波波扩散的离子将这种感受，通过你的神经系统传导到你的脑中——或者更形象地说——传导到了你的心里。

在整个过程中，氢原子扮演的是什么角色呢？首先，人身体的2/3都是由含氢水分子构成的。如果你是一个150磅（68千克）的成年人，你身体的大部分都是由紧贴在一起的10磅（4.5千克）的氢和80磅（36.3千克）的氧组成的，它们通过各种途径进入了你的身体。从某种意义上讲，正是它们维持着你此时此刻的存在。如果更仔细地观察它们在你身体里所做的事情，你也许会更加开心。

人与环境之间的氢交换

原子振动的本质会帮助你理解“你为什么是你”这一问题，也有助于你记住水分子的轮廓形似米老鼠脑袋这一特点。

两粒氢原子骑在一粒氧原子上，占据的是氧原子同一边半球相对的两个位置，因此水分子看上去就像是球形的米老鼠头部长着两片圆形的耳朵。氢原子这样的排列方式使水分子形成轻微的偶极，两端电荷相反，从而给水分子带来很多奇特并能维持生命的性质。在水分子这个“米奇脑袋”上，耳朵的位置具备轻微的正电性，而脸颊处则是轻微的负电性。这会有什么影响呢？你一定听说过“异性相吸”，所以这种不对称性就使得水分子间倾向于以耳朵靠脸颊的方式相互吸附，就和其他带电物体一样。尽管这种被称为“氢键”的作用力比起构成分子的共价键弱得多，但它们对你和整个世界的影响却是令人印象深刻的。

当你出汗的时候，你就能感受到氢键的影响了。你皮肤表面的温度促使汗水中的分子运动加剧，于是液态分子转化为气态粒子，汗水也就因此而挥发。热量破坏的氢键越多，获得自由的水分子也就越多。水分子的逃逸过程将身体的热量带到了空气中，从而让你能够保持凉爽。

水蒸气在你身边的空气中可能只占0.1%的比例（沙漠环境），也可能达到4%（湿润的雨林环境）。但是单一的分子太小，并不能像云一样反射可见光。寒冷的清晨，你呼出的气在嘴唇不远处的稀薄空气中形成一团“白雾”，只是因为严寒使得呼吸气体的热运动减缓，氢键更有效地将水分子拉拢到了一起。水分子在它们的作用下形成闪闪发光的小水滴，尺寸大到足以被你看到，却也小到足以扩散。

尽管你身体中大多数水分子是通过饮食的方式进入，但水蒸气还是会在每一阵微风袭来时碰撞着你的身体，并在每一次呼吸时洗刷着你的呼吸系统，其中一些便会通过肺部的海绵体扩散，并随着你吸入的氧气一同进入到血液中。泪水中的氢键也会将空气中的水分拉到你的眼睛里，而与此同时，还有一些水蒸气分子钻到了你头发中的细微缝隙中。

和一些理发师聊天，或许会让你加深对此的认知。在我上一次去剪发的时候，理发师帕蒂便让我对头发与水蒸气之间的结合力有了更深的理解。当我问她是否知道水蒸气可以渗入到头发中时，她转了转眼珠，表情似乎在说，我还不如问她知不知道剪刀长什么样呢。

“当然了！”她说道，“你的头发是鳞片状的，看上去有点像松果。使用吹风机时或者在炎热的天气里，鳞片会打开，并将内部暴露在空气中；这时，水分就会更容易地进入到头发中，并让头发看起来更厚实。”

卷发则更加明显，因为卷发的鳞片难以紧密地重叠，水蒸气会更容易地穿过缝隙。有时候，你甚至可以眼睁睁地看着这样的头发在潮湿的天气中出现变化。“我可以迅速判断外面的空气是不是很潮湿，”帕蒂说，“因为顾客的头发会比平时更蓬松。”

我住在纽约郊外偏远的地方，在这里，碰到一个破坏发型的天气并不是什么大不了的事，至少跟我在一起的多数人并不在乎。我们经常会用汗水、帽子和发胶折腾着我们的头发。然而头发与湿度的关系对于有些人来说却极为重要，一家名为“发型天气预报”的网站会监测全美数百座城市的大气环境并公布每日“发型指数”，从而满足这些人的需求。简单输入你准备前往的城市名字或区号，你便可以做好充分准备，抵达一座阳光明媚的“10”分城市，或是在前往潮湿而令人沮丧的“1”分城市前，准备好迎接即将到来的“一头卷毛”。

水分子在你和大气之间存在着交换，这也意味着你和环境之间或多或少是相连的。同时，尽管气态的水分子来去自由，构成它的这些原子还是在你体内搭建起了异常稳定的组织结构。当你的头发吸收或释放水分子时，毛发纤维中的蛋白质也会跟这些过客做一些氢原子“贸易”。你的头发不仅会和空气共享氢原子——通过这种方式，你与居于一室的其他所有人都共享了这些位于发梢的原子。

氢原子持续不断地在分子间进行重组，这是因为联结它们与氧原子的共价键尽管强度很高但却变化无常。这些原子在构成水时，可以像螺栓与螺母一样紧密相扣，但也可以自行解开重组——虽然是相同数目的相同分子，排列组合方式却已不同。生活在史前时代的祖先们饮下去的水分子，现在填满了你的玻璃杯——这个想法固然有趣，但水分子之间

共享原子的先天属性却决定这不过是异想天开罢了。你体内的氢原子和氧原子或许都已是数十亿岁的高龄，但它们构成的水分子只不过是临时邂逅的产物。

不难猜想，在原子参与构成某种分子形式之后，它们也会因此带上某些特征，好比饭盒在装过一次食物之后，会散发残留的气味一样。然而，水分子并不会保留对前一位主人的“回忆”，不过人们却难以认可这一点，由此对水资源的处理方式产生了重要影响，尤其当干旱地区因缺水而促使利用排泄物制造再生水的时候。澳大利亚、新加坡还有其他一些地区的市政部门极力说服市民，这些再生水已经由“马桶废水循环系统”彻底净化，实际上比一般自来水和瓶装水都要更纯净，但这些水依旧销量惨淡。目前，纳米比亚温得和克市市政供水量的1/3都由这种回收方法获得，而宇航员的日常饮用水则是从他们自己的尿液中提取得到，并没有产生不良反应，也没有余味。然而，用原子或者分子这样的术语去理解食物和饮品实在颇为困难，因此推动废水循环的预案常常会被选民否决，即便是那些濒临水资源短缺危机的地区。哥伦比亚大学地球研究所发布的一条博客中，引用了环境工程师尚恩·斯奈德（Shane Snyder）所说的一句话：“幸运的是，只要他们信任这种循环利用方式是可靠的，大多数人还是会予以理解的。”事实上，这个星球表面所有的水分子都在不断回收利用，就像斯奈德解释的那样：“我们无论如何都会喝到再生水，无论它是来自山泉溪流还是来自地下。我深信，我们应该采用更为可控的系统工程来操作这一循环过程。”

当抵达一个新地方几小时之内，你头发中就会有约1/10的氢原子是从外界进入角蛋白的；三到四天内，你头发中的水分就会和周围环境的水蒸气达到完全的平衡状态。但大多数构成蛋白质与其他生物分子的结构性氢原子，则是通过饮食渠道进入了你的身体。我们之所以能够了解这一切，都是因为如今科学家们已经可以追踪原子的运动。这一成果还要感谢稀有的稳定同位素，它们与常规的同位素存在着微小差异，但差异并不足以在元素周期表上以“新元素”的名义将它们标记。这些同位素协助科学家们追踪原子在你身体里流进流出的过程，就如同烟雾或气味将本不可见的空气流动状态显现出来一样。

氘是一种天然存在的氢同位素，它在宇宙大爆炸发生后的不久便产

生了，其含量相对于正常的氢来说并不算多。它与正常的氢原子之间的差异，只是在原子核的质子以外，还多了一个中子，而你会在完全注意不到任何不妥的情况下，喝下一杯由氘构成的水。这种同位素较大的质量，使得氘成为一种有用的原子识别物。比如当湖面的水蒸发时，相比于那些因为安了氘“耳朵”而增重的水分子，正常的分子从水面逃逸就会容易很多。如果体验过“扬场”，也就是在大风天里通过抛撒将麦子跟麦壳分离的过程，大概会对此深有体会，因而也就容易理解。干热环境会使得湖泊及地下水具有富集氘同位素的趋势，这种效应会使得不同水样之间出现差异，并足以让科学家们推断出水源所在地的气候、海拔及纬度。你和其他生物也会喝下这些含有氘的水，因此这些揭示原子踪迹的标记物也会存在于你的身体里。

数以千计的对世界各地水资源的同位素分析已展开，尤其是北美及欧洲地区，详细的分布图可以帮助我们去比对特定区域人群的头发、指甲与骨骼含氘量。你甚至可以登录Waterisotopes.org这一网站，向“在线沉积同位素计算器”中输入你所在地的经度与纬度，并由此查询到你所在地区沉积物的平均氘氢比。这一分布图被称之为“同位素地形图”。

犹他大学的生态学家詹姆斯·伊尔林格（James　Ehleringer）和他的团队一起，分析了大量人类毛发中氘氢比之间的微弱差异，发现通过喝水、喝咖啡或是喝本地牛奶等途径，地下水中的原子会成为人体内稳定的部分，这一成果的论文发表在《美国国家科学院院刊》（Proceedings of the National Academy of Sciences）上。相比于空气交换，地下水中的原子转化为身体水分或更稳定的固体结构是一个缓慢的过程，例如毛囊需要一周的时间才能将环境中的氢原子沉积到正在生长的发根，不过这个过程一旦发生便是永久的。

你身体中固体部分氘同位素的丰度反映了你所喝水的同位素构成，从而又进一步反映了水源地的气候状况。在上述论文中，全美氘“同位素地形图”采用不同颜色来展现丰度，代表高丰度值的明亮橙红色覆盖了温暖的得克萨斯，并渐变到代表低丰度值的深蓝色，覆盖的位置则是那些潮湿阴冷的西北各州。在研究了全美国各地理发店地板上的头发碎屑之后，伊尔林格的团队发现，不仅本地水中的原子会出现在本地居民的身体中——水中的同位素平衡同样会得到体现。例如，得克萨斯的居民，

相对而言就比北部落基山脉的居民更有可能生长出较重的头发。

你所饮用的水资源越是本地化，你的身体就会与本地的同位素构成比越匹配，反之如果你饮用了大量瓶装水，就更可能与其他一些地区的同位素构成相关联。举个例子，一位佛罗里达的居民长期消费缅因州灌装的矿泉水，那么他或她的身体里所含的氘就会比饮用自来水的邻居们更少，尽管他们都在同一家超级市场购物。

犹他大学的加布里埃尔·鲍恩（Gabriel Bowen）启动了一项课题，研究者们分析了美军某个驻伊拉克巴格达军事基地的士兵们的瓶装水中的同位素特征值。不同样本的氘含量分布差异巨大，由此也反映了它们产地的特征。最轻的水来自欧洲，而最重的水则源于沙特阿拉伯，这也符合对湿冷与干热环境中氘同位素的差异的预测。更重要的是，样本中所含的氘原子无论如何都比当地沉积物中的氘含量更低，也证明分析对象中没有一个水样是在巴格达灌装的。尽管水中的氘对于喝水的人来说并无直接的健康影响，但在这个案例中将其作为示踪剂，却可以帮助识别那些水是不是装在回收瓶中的本地受污染的假冒水。

头发就如同某种记录仪一般，记录着生长环境中的原子分布，也揭示了其与本地水源之间的物理关联。伊尔林格研究了一名从中国搬到犹他州的男子，发现他的旅行轨迹就刻画在他头上的“同位素记录”中。通过对单一头发丝内固定间距的氘浓度进行分析，研究者可以确定这名男子何时抵达了他的新家。在盐湖城喝了一个月的“轻水”之后，该男子的发根相比在北京生长的发梢而言，氘的含量降低了很多。

人类与所处环境之间的原子联系非常持久，因此考古学家也利用这一原理研究古代历史。一项发表在《考古科学学报》上的研究，通过数百年前木乃伊的头发丝重现了一名印加小孩生命中最后几个月的一些行踪。头发中高浓度的氘，可以解释为这个小孩在生命中最后一年的大部分时间里，都在喝着较为温暖的水，而水源地则位于海拔1英里处，比起发现印加人木乃伊的安第斯山脉顶峰低了很多。发丝中部那些在冬季形成的特定蛋白，所含的氘同位素略有下降，这是因为冬季时水体蒸发速度较慢。接近头皮处的高浓度氘说明孩子的死亡时间是夏天，而他是在死前一周以内抵达了高海拔区域。

当某人成为一具脱水的木乃伊后，残存的皮囊中最为常见的仍然是氢原子与氧原子，只是此时它们不再是水分子，而是分散到了固体部分的各个角落。例如一个血糖分子，其中包含了12个氢原子与6个氧原子，它们围绕在一个碳环周围；而肌肉中那些强韧的纤维，也是由这些元素构成的。组织结构中大多数氢都可以追溯到血液，但其中的1/4到1/3，都来自一年内所喝的水。

在更大范围的生命原子图谱中，食物中的氢还是会追溯到水。肉类与牛奶中的氢原子，都是从动物消化的水和植物组织循环而来。进一步讲，这些被食用的植物组织，都是由二氧化碳和水转变而来的，并且血糖在代谢时可以产生同样数量的CO_2和H_2O，这也并非什么巧合。1磅肉或1磅蚕豆中所含的原子，在氧气的作用下，可以重组得到相同重量的二氧化碳及水汽。

如果你可以在原子层面上探访你的身体表面，你会因看到水分子如何维持你的生命而惊叹。现在，是时候更深入了解你的原子世界了。

水分子的人体之旅

想象一下，你在缩小了成千上万倍以后，跟着一口自来水穿过人类的消化道，然后又跟着一口潮湿的气息跑了出来。在这个思维实验中，你还是太过庞大，还远远不能跟随水分子进入血液，但已经可以感觉到身边的液体跟平时的饮料很不一样了。水分子总是通过氢键互相依附，所以很难将它们分离开，此时水感觉就如糖浆一般，既黏又稠。

如果你的尺寸再缩小数千倍，仍然会比水分子大上一万倍。此刻你已成为一颗布朗运动颗粒，受到水分子更为猛烈并且永不停息的袭击。每个分子都比一架喷气式飞机运动得更快，而你会很庆幸它们没有更重一些。不过尽管如此，你仍然过于庞大，不能跟上水分子旅行的脚步。

继续发动你强大的想象力，再缩小这最后的一万倍，你就成了跟水分子差不多大小的颗粒。很不幸，此时分子的碰撞已经变得难以容忍，因为撞击者具有跟你同样的尺寸。你可以天马行空地去思考这个问题，同时脚步跟上水分子。

这一口液体本来似乎是黏在一起的，在你的内脏中朝着一个方向移动。不过在这个由振动颗粒构成的混乱王国中，大多数明显的运动都是由热力驱动，因此几乎是随机的。已经缩到水分子大小的你，如同你的那些分子邻居一样，冲刺一小段距离，碰翻点什么，然后又因为撞到其他什么东西而弹开，一遍一遍又一遍。你究竟有什么目的，或是要在什么时间抵达某个地方？

如果你需要采用可控的方式来移动大量的物质，那么你的身体将会调动肌肉与骨骼来从事这项工作，但也会消耗能量。例如，胃部的肌肉收缩会帮助移动并处理你的食物，但是这些肌肉细胞也必须获得回报。相比于舞蹈而言，这样大规模的分子移动代价更为高昂，也更为有序。

不过另一方面，你也可以不付出代价地进行物质传递，不过只限于短程。为了实现这一点，你可以利用原子与分子的振动来推动周围的物

质，从而不会消耗任何能量。你的细胞内部到处充斥着布朗运动，而这是将物资与废弃物搬运到指定地点的动力。不断舞蹈的水分子产生的冲击压，协助基因与蛋白质折叠，并保持适当的形状。甚至那些缺少四肢无法游泳的致病病毒，也是在水分子的热运动推动下，与你的细胞进行接触，随后可能会进入细胞并将你感染。

这种运动并不稳定，却异常迅速，只要行进路线不是太长，水分子的运动方向即便发生一百万次错误，也仍然会立即到达指定地点。想象一下你正在闭着眼睛试图走出一间拥挤的房屋——只要给你足够的时间，迟早你都会发现门口。但在原子尺度而言，这个“迟早”可能也就是一瞬间，远远不足一秒钟。

原子与分子本身这种无休无止的舞蹈，对于由细胞而非同质化的材料组成的人体而言更为有利。在细胞中，你可以同时调动两种运输方式，不过是在不同的情形下。像火车把货物送到配送中心一样，脏腑和血管把富含能量的大块“物资”送抵有需求的地方；然后在那里，没有成本的热运动就推动“物资”采取随机漂流的方式进入你的细胞内部。但热运动的旅程必须很短，因为这种没有目的性的运动所需要的时间与距离的平方成正比。

根据生理学网（PhysiologyWeb.com）上的在线测算，氧分子只需要几毫秒的时间便可以从肺部挤出并扩散到红血球细胞的中心。但如果扩散距离增加，那么所需时间会大幅增加，分子会来来回回地徘徊而不是直奔目标而去。举个例子，穿过指甲那么长距离，需要几个小时的时间，一周以后才能到达拇指。我们之所以能够很快闻到身边人的香水味道，靠的是物质流动而非扩散，单纯依赖扩散，香水的味道大概需要花上几年的时间才能充满整个房间。尽管如此，布朗运动这种短途搬运还是做出了非常出色的贡献，我们将其称之为“渗透”（针对水而言）或“扩散”（对于其他分子而言），食物、空气和各种流体都是在这一运动的驱使下进入或离开细胞，并且几乎不会消耗什么能量。例如一个信号分子，可以在百万分之三秒内，从一个神经细胞传递到另一个细胞中，这样就能让你对环境做出快速应激反应。这种直接搬运与随机运动相结合的方式，也成为地球上所有生命体的能源经济基础。

如果你还在继续着我们前述的思维实验，那么现在请准备顺着一条“血河”前行。我们要从两端开放的消化道真正进入到身体内部，而这就是第一步。

细胞内部的主要成分都是水，因此这像是一次野外旅行，只不过穿行的是肠道细胞。一切物质都在运动，不同分子都在激情四射地舞蹈，在这里的遭遇很容易会让人忘记，我们所熟知的生命形式只会在更大的尺度下才存在。

一串紧紧相连的蛋白质将细胞的一角与邻近的细胞连接起来，就像一座起伏不定的缆车。这是驱动蛋白，是一台由布朗运动驱动的微型机器。水分子不停冲击着驱动蛋白，而其中的荆棘状结构则确保物质不会向后移动，而是顺着“缆车”形成向前的净移动。通过这种方式，由热力驱动的驱动蛋白协助向细胞提供内部工作所需的“物资”，它们都是从你的口中来到细胞的原材料。

不远处，水分子集聚在一颗蛋白质周围，而蛋白质紧紧地缠结着，不停地振动。那是一个消化酶，所以你最好跟它保持距离。它是切割糖分子的专业户，其中一些碎片最后会成为二氧化碳，从肺部呼出。酶的形状很独特，可以抓住糖分子，随后通过使其弯曲的方式将其切碎。如同所有这类分子一样，消化酶的形状并非只是它本身的特征，而是通过与周围的水的协同作用形成。酶的不规则表面上存在着微弱电荷，可以吸住贴在它表面的水分子。这样就会使得酶的一部分向外扭曲，并迫使另一部分向内弯曲，从而将酶塑造成最合适的形状，使其能够完成切割食物的工作。

水分子的热运动普遍存在，所有的细胞都依赖其完成自身的新陈代谢。进入到细胞中心的大量氢原子核都被困在线粒体周围，看上去渴望逃脱，却被一层特殊的薄膜挡住了。薄膜的表面是一些细小的孔道，迫使它们只能从孔内流过，并“上交”储存的内能，供其他地方使用。对于包括你在内的恒温动物而言，线粒体还能够生产热量确保布朗运动在恒温状态下进行，以协调细胞内物质搬运及相互作用的速率。

你现在需要加快脚步，直接顺着血管向肺部进发。肉质的阀门打开，你被吸入到心脏；接着是一记强有力的收缩，你跌跌撞撞地离开了

右心室；片刻之后，你又进入了肺毛细血管的迷宫，扩散的力量将你推到了一个小气囊中；随着胸部肌肉的一阵收缩，你便随着一股温暖而潮湿的气息从身体里出来了。

如果你打算跟着你的那些水分子伙伴们在大气中继续飘荡，或许最终你会看到它们凝聚起来，然后在这个世界的某一个地方落下。到它们重新进入到生命体时，不过是几天光景。在这些氢原子和氧原子漫长的生命中，你的身体也只是它们的无数寓所之一，而与你共同分享这颗行星的那些生物，也和你一起采用同样的方式分享着这些原子。

接下来要讲述三个原子在自然界传承的案例，两个发生在近期，而第三个则发生在遥远的过去。

原子传承的三个案例

含氢的角蛋白不仅可以构成头发，同时还可以构成喙、爪、蹄和羽毛等部位。因此，野生动物学家可以通过对氘的测定，从而确定动物的迁徙轨迹，因为它们的角蛋白中印刻着饮用水留下的原子指纹。

这样一项研究成果在2000年的《环境科学》（Oecologia）上发表，揭示了亚利桑那州树形仙人掌与白翅鸽之间匪夷所思的密切关系。鸽子的体液样本显示，它们体内的氘含量每个月都有变化，但在当地5月初直至6月中旬的雨季之后，其浓度紧接着就突然上升。这些鸽子的身体就像是一面镜子，反映出了当地仙人掌花期与果期的年度循环。

相比于地下水来说，仙人掌花蜜中含有更多的氘，因为植物在空气干燥的沙漠中容易失去大量水分。当仙人掌花在雨季到来之后盛开，鸽子们饮用的花蜜超过了饮水量。连续吸食几天花蜜后，鸽子体内的氘便会富集。在这之后，仙人掌果实成熟，鸟儿们又开始吃果肉和种子，饮食结构的这种变化进一步提升了体液中的氘含量。

这项研究不仅证明，亚利桑那州的白翅鸽实际上很大程度依赖仙人掌作为它们的营养来源，同时也详细说明了栖息地是如何影响鸽子行为的。当然换到你身上也是一样的，尽管你或许住在大城市里，但构建你身体的原子，同样也是来自地球上的原子库，跟亚利桑那的鸽子与仙人掌一样。

另一项由地球化学家托尔·瑟林（Thure Cerling）及其国际团队展开的研究很容易让人回想起伊尔林格的工作，他们采用同位素示踪法对肯尼亚北部的象群与环境之间的联系进行了研究。研究成果被整理成一篇题为《使用同位素记录法研究动物生长史》的论文，发表在《国家科学院学报》上，论文证明了大象尾毛与当地雨季及河水间的部分联系。

被测试的四头象来自一个家庭，被称为“皇室成员”（Royals），它们均佩戴了无线电项圈用于追踪，每当换电池的时候它们就会被固定

住，同时取下尾毛样品。当地河水与尾毛的同位素组成同时一起被分析，并且附近的气象站也在监测降水。所有的记录跟踪比较了6年以后，显示出了令人瞩目的结果。

在潮湿的季节，埃瓦索恩吉罗河（Ewaso Ng'iro）的氘含量会迅速降低，因为多云多雨的气候会减缓河水的蒸发，并对其进行稀释。作为响应，“皇室成员”的尾毛及新生角蛋白的氘含量也会下降，速度几乎与河水同样迅速。这是大象从当地水源中持续获取氢原子并形成毛发蛋白质的结果。“皇室成员”的毛发每周生长大约1/4英寸（0.6厘米），这些蛋白质分子记录了这些大象与世界的原子联系。

氧元素也是水分子的成分之一，故而水与动物之间的关联也可以通过追踪氧的同位素进行，与氘一样。密歇根大学的古生物学家丹尼尔·费舍尔（Daniel Fisher）便采用此法研究几千年前就已死去的大型哺乳动物。通过测量古象长牙中氧18与氧16之间的比例，他革新了对乳齿象的研究方法，而乳齿象是一种在最后一次冰川期后不久遍布于北美大陆的动物。

自五大湖地区各州出土的象牙保存完好，在将它们切片并抛光后，费舍尔注意到了一些狭窄的环，很像是树的年轮。与如今的大象一样，乳齿象的象牙也是增长的门齿，在它的生命里会慢慢生长，形成很多层。费舍尔知道牙齿是由钙、磷等原子散布在氧原子中构成的，因此他猜测，当时的湖水、河水甚至雪中的那些氧原子，现在正静静地沉积在这些古老的象牙之上。

通过将样品研成粉末并分析含氧量，费舍尔测定了每一层同心环的相对同位素丰度。与氘一样，温暖的条件会使较重的氧-18倾向于更加富集，因此在每一层同心环中氧同位素的震荡分布比率说明，这些动物所饮用的水温也在周期性地升降。换句话说，这些乳齿象与当地的水温之间有着原子层面的关联，象牙中记载着季节性的气象信息。

由于很肯定这些环是因年度生长所形成的，因此测试结果不仅反映了这些动物的年龄，也包括了性别信息。有些象牙的生长情形比其他象牙更为多变：幼年时期形成的环位于中心，厚度非常一致，但到了9岁至12岁时，环的厚度就变薄了。自那之后，环的厚度每3到4年会发生一

次变化，可以判断这些动物为其他生命体贡献的营养物质多于它们自己生长的。显而易见，更为多变的象牙属于成熟雌性——乳齿象妈妈。

纽约西部出土的某根雌象象牙生长速度出现了异常下降，可以证明它是在9至10岁间第一次怀孕，在这之后最薄的环层说明它又花了两年时间哺育幼崽。这位象妈妈的象牙上，镌刻着6次怀孕及断奶的印记，直至它34岁时离世。通过氧同位素测定的水温显示，它可能是在春天出生，较薄的环重复出现的区域也说明，它需要持续花4年的时间喂养它的孩子。当年轻的幼崽可以更加独立，不再从它的母亲那里获取原子时，母亲的象牙环又会重新开始增厚。

费舍尔研究的每一位乳齿象母亲，都会在养育孩子时消耗自己的身体，它在营养方面做出的牺牲也会留下不可磨灭的原子印记，就像它经历过的那些季节，它所觅食的那些植物以及它所喝过的水一样。数千年以后的今天，最后一头乳齿象妈妈也早已融入了这颗星球，化作了元素维持着你和我的生命，但我们却仍然可以阅读这些镌刻在象牙上的故事。

氢——生命的始祖

从太空中看，我们的地球主要呈现蓝色、白色与绿色，但是几乎所有颜色都归功于水分子。即使在如此宏大的尺度观察，你仍然可以看到原子振动的证据，并可以帮助我们确定地球上生命体的分布与特性。

蓝色区域代表的是快速振动的水分子（地表液态水），振动速度快到足以让其维持液态，但还没有快到成为气态，至少氢键还能将它们束缚在大气层之下。奶油色的云层是冷却的水滴（空气中的水），氢键的特有黏性将蒸气分子从热运动更快的空气中拽了出来；云层随风飘荡，或膨胀，或收缩，都是由于包裹它们的空气随着温度变化振动的速率也在变化。白色的雪与冰代表的是寒冷，其中的分子振动缓慢，氢键将水分子冻结成了多孔晶体晶格，并且它们能漂浮在水面上——鱼儿应该感到庆幸，正因为如此，冬天冰层才不会沉到水底，从下到上把江河湖海填满。

地面上的绿色区域同样代表了水的存在。根据水文学家斯科特·杰希克（Scott Jasechko）及其团队近期在《自然》（Nature）上发表的文章，植物每年可以将15000立方英里（61440立方千米）的地下水蒸腾到大气中，几乎每4个月就能将五大湖的水消耗干净，超过世界上所有河流的年度径流总量。森林、田地及草原的蒸腾作用形成了这个星球上最大规模的淡水循环。

但是最终紧密联系空气、海洋与植物的还是持续进行氢核聚变的太阳。当我们忙着工作时，很容易忽视了这一点。但如果这个过程突然消失了，哪怕只是几秒钟呢，一切不是人工照亮的物品都会消失在黑暗之中——我们平时不会注意，之所以能够看到风景，看到街市，甚至还有月亮，都是因为它们反射的阳光照进了我们眼睛里。如果没有阳光，午间的天空也好似是透明的窗户一般，可以直接欣赏银河，“白天”与“黑夜”这些词语也变得毫无意义。所有室外的光合作用全部偃旗息鼓，如果持续的时间足够长，大气中的氧气含量便开始迅速下降，并且越来越快。

但在氧气远未耗尽之时，我们就会因为干渴或寒冷而死，因为太阳的热量驱动着地球上分子的热运动并保持着较快的速度，一旦没有了太阳，一切都会慢下来。寒冷的月球阴面，温度可以降到零下300华氏度（零下184摄氏度），而尽管空气中的温室气体可以让我们远离这样的寒冷之夜，但这些储存于大气“棉被”中的热量其实主要还是来自太阳。没有了这颗陪伴我们的恒星，正常的天气系统将会停止，留下的只是逐渐干涸的大陆，以及缓慢冻结的海洋。

天文学家非常清楚，当一颗行星的恒温系统温度设置过高或过低会是什么样子。充满蒸气的金星比我们更接近太阳，上面的水分子振动异常快速，氢键已经不能将它们锁定在液态。火星上呈现的景象刚好相反，因为太阳的热量不足以激发分子快速振动，火星上的水几乎都是固态，尽管遥远的阳光可以温暖单个分子，让它摇晃、松动，直至逃逸，来到另一处冰晶上重新附着。

泰坦是土星的一颗冰冻卫星，它表面上的水已经被冻成磐石一般坚硬，并构建了地表地貌。液态甲烷与乙烷形成的湖泊与河流点缀着星球表面，这些碳基分子从烃类物质的云层中凝结而来，以极其缓慢的动作在异常寒冷的大气中跳着舞蹈。虚拟的泰坦居民可能会戴着冰质首饰，就像我们佩戴蓝宝石一般；他们或许也会惊讶，像我们这种行星，居然会淹没在由水质“岩浆”构成的海洋之中。

我们赖以生存的地球，之所以能养育这些我们熟知的生命形式，都是因为它表面有大量的液态水。进一步说，是因为我们的轨道与太阳的距离恰到好处，水分子随着海拔、纬度与季节的不同，可以在气态、液态及固态之间变换。地球表面的热运动被调整到这样一个狭窄而又偶然的温度范围中，甚至1摄氏度的温差就可以将雨变成雪，或是将碧波荡漾的湖泊冻成坚硬的冰原。

原子之舞最初是由希腊-罗马人通过纯粹的演绎推理出来的，如今，这种舞蹈如此美妙的细节也已经可以被我们观察和欣赏，就像我们生命中最基础的元素一样。你身体里的每一个原子之所以存在，都是源自百亿年前宇宙大爆炸时开始扩散的氢原子，我们离不开的水分子也是由原始的氢原子所产生，并被赋予了特殊的属性。一切与水有关的生命活

动，不管是叶片中的绿色组织，还是你身体里的细胞液泡，都是因为这种两颗氢原子骑在一颗氧原子之上构成的分子而存在，它遍布于整个地球，并且在氢核聚变的太阳驱动下，振动不息。

氢原子，只要给它们足够的时间，确实可以变成人。这句话如此正确，而且如此令人咋舌——我们如今已开始认识并欣赏它是如何实现这一切的！



对铁的性质及用途的认识，与人类文明之间存在着密不可分的联系。

——乔治·福恩斯

（George Fownes，19世纪英国化学家）

记住可怖的恒星之曲——在你出生之前，你就曾经知道它。

——约翰·丹尼尔

（John Daniel，美国当代作家、诗人，

上文选自其诗作“One Place to Begin”）

公元1054年夏天，一个晴朗的早晨，一位叫作杨惟德的中国星官，观察到一颗从未见过的星星出现在东方天际，闪烁发光。他立即向朝廷递送了急报，上面写道："臣伏睹客星出见。"相关记载仍然可在宋朝留下的官方资料中查阅到。那时的杨惟德或许不知道，他描述的乃是宇宙中最为壮丽的现象之一。同时，他也记录了一次遥远的爆炸式的原子诞生过程，这些诞生的原子与流经他静脉的原子一模一样，与组成他那些观星仪的原子也毫无差别，与构建他脚下地球的原子更是一般无二。

根据天文学记载，这颗星最初是红色的，但随着它移动到地平线以上更高的位置后，开始变成灰黄色，很像是太阳透过沙尘暴后的景象。杨惟德非常肯定这样的细节具有政治意义，因为黄色是帝王之色，因此他在记载此事件的官方文件中写道："谨案……明盛者，主国有大贤。"

语言学家班大卫（David Pankenier）在对中文文献进行分析时注意到，作为朝廷司天监的高级官员，杨惟德很明显是出于对皇帝的奉承，将这种天象曲解为一种吉兆。和时下一样，政治诡计就如同物理和化学一般一直是人类生活中的一部分。一位名叫赵抃的侍御史针对此次客星到访提出了妖星一说，而他本人当时正在参与一场弹劾内阁的风波。他提起了公元1006年的那次"客星"记载以及伴随而来的一系列灾难，最终得出结论认为，这一次天象预示着包括匪患及地震在内的很多麻烦，而这些都是皇帝失职的反映。

宋代文件描述道，在长达几周的时间里，这颗星都可以在白天被看到，随后变得只有在晚上可见，大约两年后完全消失。司天监的记录如下："客星晨出东方守天关，至是没。"在中国的星图中，天关的位置很靠近参宿三星，也就是更广为人知的"猎户座"；而有关客星位置的历史记载也使得现代的天文学家可以将它和它的残骸——蟹状星云联系起来，后者就位于猎户座腰带上那三颗星构成的斜线上方不远处。

同一时期，一位远在西方（现在属于伊拉克）的学者也记载了这一事件。这位名叫伊本·巴特兰（Ibn Butlan）的哲学家和医师写道："这颗壮观的星星出现之后，我们这个时代便出现了一种流行病……这一年秋天，君士坦丁堡有14000人因此死去。"比起今天，此时西亚的杰出科学家也和东方的同行们一样，更倾向于将天文现象与人类事件以因果关系

联系起来。伊本·巴特兰继续写道："这颗壮观的星星出现以后，还引起了开罗老城区的疫病暴发。"

尽管我们对星象与瘟疫、政治之间的直接因果联系都会表示怀疑，但伊本·巴特兰和杨惟德都认为一些看似互相割裂的事实之间存在着隐性关联，这个观点还是正确的。而且最新的调查也发现，星星确实会影响疾病与人类社会，虽然只是通过从它们而来的金属原子间接地影响。

一直到了近900年后，才由阿尔伯特·爱因斯坦给出了更为有力的关系式，证明了太空中的爆炸与我们身体之间的联系。他那著名的公式：E＝mc2，把质量和能量用等号连接起来，从而能够帮助我们理解那些垂死的恒星是如何产生生命元素的。"那是一种光荣的感觉，"他在给朋友的一封信中写道，"当认识到一些看上去完全不相关的复杂现象居然可以被统一起来的时候。"

根据传记作家沃特·艾萨克森（Walter Isaacson）的记载，爱因斯坦对这种神秘而不可见的力量早有思考，并可以追溯到他的童年时期。在他四五岁的时候，他曾经因为生病而卧床。他的父亲怕他无聊，便给了他一只罗盘。看着罗盘的指针晃动，像是在被一只无形的手摆弄一样，他陷入了沉思，这也指引了他后来对磁力与引力的探索。多年以后他曾解释："我仍然能够记起——或者至少是我相信我能记起——这些经历给了我深刻而持久的印象，事物背后一定深深地隐藏着些什么。"

不过即便是爱因斯坦，也没有获得必要的信息，从原子层面上描述出中国客星、使他生病的细菌以及奇妙的罗盘指针之间的微妙联系。跟先前的杨惟德和伊本·巴特兰一样，他离世之时，并未有幸看到解开这些谜团的新发现。我们当前正处在由一系列技术创新所引发的知识大爆炸时代，这些创新只有在一个元素的帮助下才能实现，这种元素同时存在于这些并不相关的人和现象之中。

铁，恒星杀手，可能是宇宙中最具破坏力的元素，同时却也是人类生存的万能钥匙。你的身体将它用作从空气中收获氧气的工具，同时也将它用作阻击微生物入侵的武器；从大尺度来看它的作用的话，它既能为虎添翼创建文明，也能为虎作伥毁灭文明。当远处的恒星垂死挣扎之时，也从空间深处发射出大量的疾速"导弹"，而铁就是为你抵挡它们的

盾牌。它的故事，也有助于揭示你与宇宙的其他部分在物理上深层的亲属关系。

铁的非凡特性

铁在元素周期表中排第26位，宇宙丰度（宇宙中各种元素的相对含量）排第6位。在你的身体内，它比其他的大多数元素都更重；它携带着26颗质子和30颗中子，巨大的原子核拴住了一层密密的电子云，从而可以与其他原子之间形成多重键。这些特性可以帮助解释铁在恒星毁灭时所扮演的角色，以及它在地球上的非凡属性。

原子对周围电子的排布方式非常挑剔，就像人们沉迷于自己的衣着一样。在与其他原子接近时，铁通常会贡献或共享最外层的一些电子，有时也会从邻近的原子那里抢夺电子。氧元素是它最喜欢的“交易伙伴”之一，将铁暴露在空气中足够久的时间，它就会腐蚀成为锈迹斑斑的氧化物。但如果你在一个携带氧气的血红蛋白分子中间嵌上一个铁原子，氧与铁的吸引力则会变得对你有益。

铁原子的另一个潜在合作伙伴是碳，一般在铁中含有2%或更少的碳时，铁会硬化形成钢。如果紧紧地钳住铁棒的一端，用机器强力拉拽，将其穿过坚钢模具上一个孔径逐渐递减的洞，铁棒就会像太妃糖一样，最终被拉成一根纤细的铁丝。如果这根铁丝的碳含量正好合适，再经过加热，你便可以将它紧紧地绷在小提琴琴桥的两端，在拉出美妙音乐的同时却又不至于将其折断。这样强而韧的特性源于铁原子类似滚珠轴承的能力，键合力将它们束缚在一起，但又让它们在被挤压或拉拽时能够在彼此周围相互滑动。这种既强且韧的键合力正是由电子云的相互作用产生。

用一把重锤锤打放在砧上的铁棒，铁棒会被砸平为一片薄薄的刀片，金属中的原子横向扩散，它们与周围原子间的关系却没有被破坏。在火上加热铁棒，振动更为激烈的原子之间会更容易滑动，也更容易形成新的形状。在熔炉中将铁加热到2800华氏度（1537摄氏度），颤抖的、炽热的原子便可以流动起来，并被倒入任何合适的模具中，这是铁匠们几百年前就发现的特性。

如果将铁棒两端通上电，电流便会像水通过水管一样通过铁棒。这是因为金属内的自由电子形成的松散“海洋”可以不受约束地在原子之间流动，这也是避雷针可以将闪电导入大地的原理。而如果将铁棒放置到强磁场中，它便可以吸引罗盘的指针。铁原子外层的电子移动性很强，不仅会顺着轨道围着原子核转动，也时常会跳开访问邻近的原子：一边移动还一边旋转。来自磁场的呼唤就仿佛是音乐传到了它们的耳朵里，它们会各自排列出自旋方式进行匹配。很多元素都会这么做，但铁却可以在音乐停止之后，仍然记得旋律和节奏。

罗盘中紧密结合的原子聚集成和人体细胞差不多大小的团簇，磁化的指针就通过其间的电子自旋方向产生自己的磁场。每一个团簇都有各自的自旋方向，形成微型的马赛克图案。当大多数团簇排列成一致方向并产生净磁场时，指针就会倾向于转向合适方向，使自己的磁场顺应富铁地核产生的地磁场，后者就是这么穿过数千英里的岩石与岩浆控制了指针。如果用锤子对指针进行重击，电子又会恢复成随机排列，也就不能再与地下的那些弟兄互相吸引了。

大约在两千年前，古代中国的发明家就将天然磁石用绳子悬挂起来，用于指示方向。后来在汉朝时期出现的“司南”就像是一把精致的铁质长柄勺放置在一个抛光的金属盘上，它的勺柄可以平滑地旋转指向南方。

随后的几个世纪，这种磁铁广泛被应用于风水学，这是一门利用神秘力量定位宝石和其他隐藏宝物的学问，也是一门确保建筑符合天地之气的学问。宋朝期间，中国的航海家也在穿越印度洋的军事行动与贸易活动中使用了磁铁。有些罗盘其实就是用磁石擦过的铁针，放在一盘水的表面，或是用丝线悬挂。通过当时水手与商人的传播，指南针技术在整个欧亚大陆得到普及，随后开启了远洋贸易，并对欧洲探险家最终发现美洲大陆做出了贡献。

如今，从计算机到风力涡轮机到混合动力汽车的发动机，磁性金属有着广泛的应用，并且现代的新型超磁体，利用金属钕这类非常重的稀土元素，将铁的电子排列进行统一与稳定。这就让磁铁可以变得更小，适合用于制造iPod及耳机等电子设备；也可制造大体积的设备，如丰田

普锐斯的电动马达与电池，就大概含有2磅（0.9千克）的钕。

如今，作为全球最大的稀土元素供应商，中国再一次扮演了传播磁技术的重要角色。近期中国政府削减了这些重要资源的出口量，于是全球市场都有所反应，价格暴涨，而且也开展了积极的探索，以期发现具有开发价值的新矿。幸运的是，对于中国以外的客户而言，钕的储量并不是真的像它所属的“稀土”分类那样稀少，在本文撰写期间，澳大利亚、美国及其他地区的一些替代矿源也正在被开发。

同样的重量下，钕磁体的磁性比起普通的冰箱磁条要强上很多倍。它是市场上最强大的磁体，可以从泡开的加铁麦片中吸出铁，还可以从桌面上吸起美元钞票，只因为墨水中有一些铁颗粒。即使当含铁样品以极快的速度活动的时候，钕磁铁依然可以吸引它们，这使得操控这种磁铁有些潜在危险。科学作家弗兰克·斯维因（Frank Swain）在2009年发表了一篇博客，题为《手指是如何被两片超磁体夹掉的》，博文中通过几幅恐怖的图片介绍了一个案例，两片距离一英尺半的钕超磁体突然撞到一起，不幸击中了受害者的手指。

尽管有风险，我最近还是买了一块钕磁体，当然只是用于科学目的。我的目标是为了搜寻一种不寻常的铁。钢制的厨具和其他类似物品的金属原材料通常来自两种主流的矿石：灰暗而具有金属外观的磁铁矿以及红色的赤铁矿。美国制造业、运输业及建筑业所使用的钢铁，主要都是由五大湖地区开采的矿石炼制而成。而你身体里的铁，却可以追溯到分散于土壤中的磁铁矿与赤铁矿颗粒，还有一少部分来自花岗岩与玄武岩中的辉石、云母等矿石。但这并非是全部——还有一些铁是天外来客。

很久以来，人们一直惊叹于从天而降的铁陨石，并热衷于收藏它们。数千年前，一颗重达34吨的大块头袭击了格陵兰冰盖，原住民猎人的刀和鱼叉便取材于此；法老图坦卡蒙的木乃伊佩戴的一把镍铁合金匕首，同样也是来自陨石。可以大到足够制造工具的陨铁碎片终究还是不太常见，2013年2月，有一颗重量堪比一百辆火车头的流星在俄罗斯境内爆炸，由此引发了一场追寻陨石的“淘金热”。像雪片一样撒落的碎片与纪念品可以卖个好价钱，引来了“流星猎人”们到此发掘。不过很细小

的陨石其实很容易被发现，特别当你的手上拥有钕磁铁时。

我将钕磁铁小心翼翼地与钱包保持距离，以免造成信用卡消磁；在隔壁保罗史密斯学院的陡峭屋顶上，我用它掠过雨水排沟上的沙粒，一些黑色小球从里面跳了起来，撞击到磁体的光亮表面时还能听到响声。我在显微镜下端详良久，发现了两粒很小的金属球体，在一堆不规则的沙粒中闪闪发光。它们来自于炽热的流星，在空气中飞溅成熔融态的金属，最终冷却成了小球。

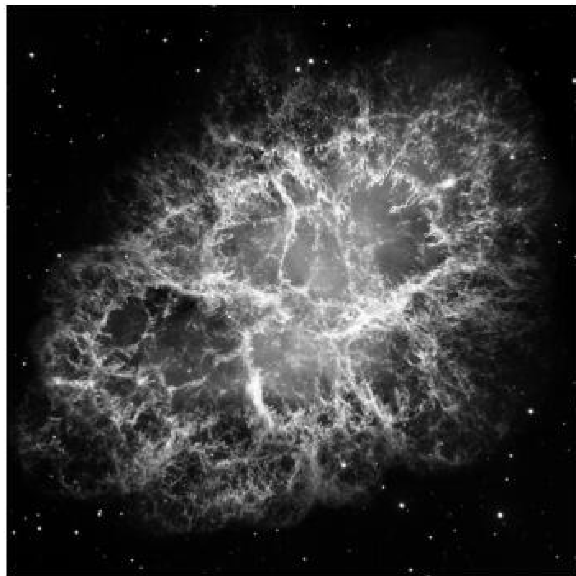
此刻它们就躺在这些粗糙的磁铁矿石中间。这些磁铁矿石虽说来自阿迪朗达克山脉，但构成它们的原子却是来自太阳系形成前的星球熔炉。从这个角度而言，这些来自太空的球体并非真的是天外来客，倒像是地球失散多年的亲戚。经历了最不可思议的飞行事故，它们终于得以在超过40亿年后首次重聚。

当流星发出光芒，随后又消逝的时候，它所携带的原子并没有真的消失，而是以更分散的形式留存在空中。大多数陨石金属会在大气中解体，在6英里的高度上形成数英里厚的烟雾，围绕在地球表面。每年大约有10万吨的太空尘埃会沉积到地面、海洋表面或是你的屋顶上，这其中不仅有铁，还有硅酸盐矿物质以及来自彗星的冰，甚至偶尔还会有火星上飞溅出的颗粒。这些物质有很多会溶解到地下水或海水中，然后以原子的形式，与它们的地球亲戚一同随着食物链进入你的身体。最终的结果就是，转瞬即逝的流星、一捧卑微的沙子、法老的神圣匕首以及摇摆的罗盘针，其实都和你分享了共同的遗产。

来自恒星的遗产

宇宙学家列举了我们每个人体内的元素可能的几种起源过程，除了氢是在宇宙大爆炸之后不久凝聚而成的，其他所有的元素都跟恒星衰亡有关。例如在Ia型超新星中，一颗恒星从相邻的伴星那里吸取物质，在超过极限后发生爆炸。在II型“核心坍缩”超新星中，质量数倍于太阳的恒星因燃料耗尽而自行坍缩，随后爆炸。还有一种情形，质量非常巨大的恒星会发射物质与反物质颗粒，两者接触时会发生湮灭，最终的归宿则是“不稳定对超新星”。如今，这类景象可以通过哈勃或斯皮策这些空间望远镜直接或间接观测到，也可在地面天文台观测到。

体内有铁的存在表明，你的原子祖先可以追溯到爆炸的恒星，而今天可以看到的超新星与星云，可以让你知道这些恒星摇篮早期的模样。蟹状星云便是其中之一，那激荡的气体与尘埃云，与我们太阳系形成前的状态颇为相似。在望远镜下，它看上去好像只是一团毫不出奇的烟雾，但实际上，它是一场横跨万亿英里的灰烬风暴，曾经属于一颗质量相当于8到16个太阳的恒星。尽管核心坍缩爆炸在700多万年前创造了这一切，但如今我们看到的星云仍然在剧烈燃烧，并且以大约每秒1000英里（1609千米）的速度膨胀。对发光的点、线条与尘雾进行光谱分析后发现，星云中含有的物质主要是氢，还有铁和其他一些元素。通过从地球上最冷的地点采集到的新数据，我们现在可以提供更多证据，以支持蟹状星云与银河最热的位置之一——公元1054年那颗将光芒传送6500光年后抵达地球的垂死客星——之间的联系。



蟹状星云。
感谢 NASA 支持

2001年，日本科研团队在南极冰川钻取了一根冰芯。在大约48米深度的区间，他们发现氮氧化物的浓度有一次突跃，时间正好对应公元1054年；在更下层的位置，还有一次突跃对应在公元1006年，也就是另一个客星出现的年份。不久后，堪萨斯大学的科学家也发表报告称，对格陵兰岛的冰芯进行的研究也发现了类似的结果。最可能引起这种全球性同步脉冲的原因，应该就是超新星辐射出的宇宙射线将空气中的氮气分子氧化，随后又沉积到了地球上。

这便是论证“客星就是超新星”的确凿证据，现在它们的编号已是SN1006和SN1054。如今你仍然可以在蟹状星云看到SN1054的烟云。

很多证据都表明，太阳与地球的发祥地位于蟹状星云的左侧，在猎户座腰带上悬挂的那把剑上。那把剑中间的“星星”实际上是很多颗恒星，飘浮在一团由恒星射线与超新星爆炸构建的星云中。围绕这些恒星的烟雾，主要是氢和氦，其中夹杂了一些粉末状的冰以及含铁矿石碎片。最新的研究发现这些恒星中最年轻的还不足100万年，用宇宙的视角看，这不过是眨眼之间，并且有些恒星还在孕育过程中。

恒星通常是在这样的公共育儿所里出生，这也是很合理的，因为大多数恒星形成所需要的原材料都已在此处聚集。那么，哪里才是我们自

己的家园所在地？我们的太阳独一无二，这似乎很怪异。半人马座的比邻星是距离我们最近的邻居之一，位于4光年外。如果乘着每小时行进约4万英里的“旅行者一号”空间探测器去造访它，大约需要8万年。一些学者认为，在诞生后不久，也许因为很久以前某个巨大恒星经过时造成的引力回流，年轻的太阳便从发源地被甩了出来。

在猎户座星云内部那些发光的气体与尘埃中，也存在着一些破碎的条纹。它们是灾难性爆炸中产生的超音速抛射物划过的轨迹，这些抛射物就像是装了发光火帽的子弹，但体积却有太阳系的数倍大小。对于宇宙学家而言，这种元素的存在就好比是在凶杀现场的火药痕迹，因为铁就是毁灭恒星的凶手。

产生这些条纹的星体肯定要比太阳大得多，但它的寿命相对较短，大约也就是几千万年，因为超巨星消耗很快。它和SN1054以及产生太阳系的母体一样，应该都是死于“铁中毒”。这些结论都可以根据我们目前已知的星体核聚变方式推断出来。

当恒星刚刚产生之时，它将氢核聚合成氦核，按照爱因斯坦所描述的方式，释放出巨大能量。我们的太阳也在持续不断发生着核聚变，每一秒钟都会将数百万吨的物质转化为热量、可见光以及其他形式的能量。下一次当你瞥见太阳时，试着把它想象成一颗星星，不必管它是一颗大到足够装得下100万个地球的中等尺寸恒星。太阳表面的温度大约有5500摄氏度，而内核的温度则将近1400万摄氏度。所以，即便太阳距离我们很远，远到光都要跑上8分钟才能抵达地球，但它仍然可以灼伤我们的眼睛和裸露的皮肤。想象一下这些能量的源头是何等残酷的地狱，原子在那里又遭受了何等的虐待。火焰般的氢核主导着核聚变，这可以追溯到宇宙形成之初，但它们在太阳核心嗞嗞作响的这段时间可能是它们存在史上最有压力的时期。这台大熔炉产生的光和热，从某种意义上讲，就是原子受尽折磨时发出的呼喊，只不过其形式是电磁波。

宇宙学家对我们太阳系形成前的细节尚有争议，我们也不可能知道所有答案。但是地球上富含铁元素的事实，可以在那些合理的争议中肯定其中一部分细节。至少曾经有一颗核心坍缩超新星，用它自己毁灭时留下的残骸，为我们太阳系的诞生播下了火种。

这颗远古超新星的起源是一颗恒星，在它制造新元素以前的数百万年里，一直进行着氢氦聚变。质子与中子聚集成更大的核，于是在恒星的中心位置，逐渐形成了较重的核，而较轻的元素像洋葱一样，一层层地包裹在外。

这一进程的早期，当星体核心的温度飙升至数百万摄氏度时，碳核开始形成，并持续数个世纪。在这颗恒星最终死亡之后，这些原子大多数聚集成微型的钻石与小颗粒的石墨，再后来就成了钻石与铅笔的原料，以及你头发、肌肉和细胞膜中的碳框架。

在星核的外围，氦与碳发生聚变，并产生大量氧核，现在它们以水的形式存在于你的体内，或是以氧气的形式被你吸到肺里。在涉及碳和氧的核聚变循环中也形成了氮，它们中的一部分现在是谷物的肥料，还有一些则以其特有的方式进入到你的基因和蛋白质里。当星核的温度达到10亿摄氏度时，过热的氧核就会结合到一起产生硅，如今在你脚下的岩石地壳，便主要由它们构成。

大约几周后，硅核在接近星体中心的位置聚集，你身体中含有的其他大部分元素都会在俄罗斯套娃一般的分层中产生。你骨骼中的钙和磷、你汗水中的钠和氯、你神经中的钾，大部分都出自这样一个熔炉。同时，等离子体与凝聚态原子形成巨大旋涡，从火球的表面逃离，向数百万英里外的太空散射气体与尘埃。

当发展到多层聚合这一步时，形成新元素时产生的聚变热量，仍然足以支持恒星持续燃烧，不会因自重而坍缩。然而随着原子核越来越大，能量的平衡便会因重力而被打破。

带正电的质子会互相排斥，除非有一股力量让它们强烈碰撞并结合在一起。这种核力比重力要强上万亿倍，但只能在极短的距离内起作用，而且在原子核变大了的时候，质子相互之间的斥力会对核力产生明显抵消作用。因为这些对立的因素，过大的铁核发生聚变时就难以产生足够的热量以支撑起星体。

要理解原子核内这两种力量间的竞争，可以想象一下将一块巨石推到陡峭的山顶之上，就像希腊神话中的西西弗斯那样。你需要用尽全部

力量把石头推到坡顶，可等你到了那里时，重力就会从你手中将石头夺走，远远地将它滚到另一端。这个突然向前的动作还有你肌肉的张力释放，很像是星体中心核聚变能量的爆发。但是，如果你准备最后一推时，脚底突然打滑会怎样呢？你就得原地守住你的位置，而对石头而言，它并不会区别哪面山坡的下面是终点。更糟糕的是，如果地面太滑，石头会压过你向下滚去。当孕育太阳系的那颗恒星开始熔铸镍核时，其内部便会出现类似的不稳定态，铁核会迅速产生，越过了这一临界点后，随之而来的后果便是灾难性的。

过多的质子很难在较大的原子核中继续守住它们的位置，因此含有大量铁原子核的等离子体不断增加，消耗的能量逐渐与新产生的能量持平。在几个小时甚至几分钟内，一个与地球差不多大小的金属原子核球体就此产生，星体开始因自己产生的灰烬而“窒息”，直到失去与重力对抗的力量时，内核便突然发生坍缩。

强大的压力与高温将铁核碾成一个直径只有几英里的球，坚硬且密度超高。原子通常不会被挤压到这个程度，但此时原子核已经在等离子态的热混沌体中失去了保护性的电子云，故而可以被如此紧密地堆积，一茶匙就差不多跟地球上的10亿吨一般重。根据美国国家航空航天局钱德拉X射线天文台网站的说法，这样的压力，相当于是将全世界的所有人挤到方糖大小的格子中所需的压力。

星体内部的坍塌，在萎缩的星核表面与外层的等离子体之间，形成了一层可怕的空隙。几秒钟后，失去支撑的外层也发生坍缩，撞到致密的星核，然后又反弹穿过星体的更外层，惊人的爆炸便由内而外地发生了，释放出大量热、光和亚原子粒子。超新星的亮度比太阳要高出数百万倍，所以杨惟德与伊本·巴特兰在白天就能用肉眼看到几千光年以外的光芒，同时，随可见光一同抵达地球的宇宙射线，制造了一场氮氧化物“暴雨”，横跨了南北两极。

在冲击波横扫气体与尘埃构成的星云时，自身也会诱发短暂的核聚变。一部分磷核会通过这种方式产生，与此同时，金元素、稀土元素以及其他比铁重的原子都会在这短暂存在的爆炸里首次出现。体积大到足以发生如此耀眼爆炸的星体相对较少，再加上过程短暂，所以重元素相

对也就不那么常见——最终结果就是，对我们而言，它们比常见元素更昂贵。这一切，你应该感谢血液中流淌的恒星杀手——铁，正是它的存在，才使得金和其他稀有金属拥有了现在的价值。

太阳的诞生多亏了铁。冲击波将大量爆炸的碎片清除，并在邻近星体高能冲击波的协助下，形成旋转的星团。一些更为致密的星团所产生的引力吸取了足够物质，从而引发新的核聚变，其中最大的一些星团应该在冲击波刚刚经过时就已经被点燃了。所以最终的结果就是，死亡的冲击波，却点亮了一些新生的恒星，其中也包括我们的太阳。

地球的诞生也要归功于铁。当新生的太阳从它诞生的星云离开时，一些碎石形成缓慢旋转的盘状体环绕在周围，它们来自一个或多个因“铁中毒”而爆炸的星体，逐渐通过水分、磁力、引力或静电吸引聚集起来。当早期的地球成长到足够大时，其自身的重力便将其塑造成了球形，内部是密实的金属核，外层的地壳则是薄薄的一层岩石。

当你身处地球之上，你还需要再次感谢铁，你的煎锅、钥匙和汽车，你信用卡上的磁条以及控制罗盘的地球磁场都归功于它。而在地球上存在了40多亿年后，这些已经硬化的“母星之血”，仍然在你的血液和组织中扮演着毁灭者与创造者的双重角色。

蓝皮肤的人

1958年，卢克·康布斯（Luke Combs）去肯塔基大学医院看望他怀孕的妻子，但比起他的妻子，一些医护人员对他却更加关注。查理·贝伦医生后来评论说，这名男子的皮肤“就像是凉爽夏日里的路易斯湖”。于是一系列调查由此展开——一种导致白种人皮肤变蓝的遗传血液病因而被发现。

根据印第安纳大学作家凯西·特罗斯特（Cathy Trost）感性而引人入胜的报告，早在19世纪初期，“蓝精灵”就已经在肯塔基东部的山区为人所熟知。马丁·福格特（Martin Fugate）是一名来自法国的移民，他在恼人溪（Troublesome Creek）定居后，爱上了一位名叫伊丽莎白·史密斯（Elizabeth Smith）的女人。巧合的是，他们都携带一种罕见的隐性基因，而马丁与伊丽莎白所生的7个孩子中，有4个天生就是蓝色皮肤，他们的很多后代也是如此。

1975年，当本杰明·斯特西（Benjamin Stacy）在哈泽德县出生时，助产护士被他皮肤的颜色惊到了。因为担心他可能患有某种类似蓝婴综合征的疾病，医护人员迅速将他转院到列克星敦的大医院进行输血。转院手续办理之前，他的奶奶拦住了医生，问道：“你听说过恼人溪的蓝色福格特家族吗？”最近，斯特西先生告诉英国每日邮报网站，他的皮肤已经有好几周不再是蓝色了。尽管多年以来，当他感觉冷或生气时，嘴唇和指甲还是会变蓝。

“福格特蓝”的医学基础是由血液学家麦迪逊·卡维因（Madison Cawein）在20世纪60年代构建的，他同时还设计出了一种有效而安全的治疗方法。卡维因于1985年过世，他生前告诉特罗斯特，他曾花了整个夏天，“翻越了整个山区寻找蓝人”，但一直没有成功，直到帕特里克（Patrick）与瑞秋·里奇（Rachel Ritchie）走进了他的诊所。

“他们都是蓝人，而且非常绝望，”卡维因特别提到这是一个肤色意识强烈的社会，“他们因为皮肤是蓝色，确实感觉到很尴尬。”尽管福格

特家族中蓝人与一般人的健康状况无异，但他们的外貌，以及他人对山民近亲繁殖的刻板印象，给他们带来的耻辱感不亚于疾病的痛苦。

后来，卡维因的研究发表在《内科医学学报》上，肯定了有关北美阿拉斯加原住民血液状况分析的早期研究，即蓝色皮肤跟血液中一种含铁的血红蛋白有关。

血红蛋白一般呈鲜红色，当其中携带的铁元素失去电子时，它就会变成土褐色，这种形式被称作高铁血红蛋白或met-H，而失去颜色的分子也同时失去了有效携带氧气的能力，除非电子重新恢复平衡。肯塔基的蓝人缺少一种功能基因，以致不能产生用于恢复电子平衡的酶，故而血液中比平常人含有更多的met-H。

对于那些父母都携带致病基因的人来说，情况会变得更加严重，血液的颜色会从樱桃色变为略显紫色的巧克力色。在本杰明·斯特西的案例中，他最初的肤色之所以会褪去，是因为他还携带了正常的基因，在他成长期间，这部分基因足以减弱他的酶缺乏症症状。而这种皮肤的蓝色，与其说是来自血液，不如说是来自输送血液的血管。

透过灰白色的皮肤观察，我们常常看到血管壁呈现蓝色，因此会让人误以为脱氧的血液也是蓝色的。深埋于皮肤下的红色或棕色会转变成蓝色，这一点在所谓的“蒙古斑”中也得到了“证实”——在亚裔、美洲原住民及东非的人群中，九成的新生儿会在臀部或下背出现这种斑。这种蓝斑很像是瘀伤，有时会让不熟悉情况的人（白种人几乎不会出现这种情况）误以为这是虐待儿童的迹象。但实际上，这是聚集在皮肤深层的黑色素颗粒，在过了婴儿阶段之后就会逐渐褪去。

如果你的皮肤颜色较浅，那么你可以在下一次献血或是做血样检查时，亲自去击碎这种静脉血管错觉。当针头刺入蓝色静脉时，流入样品瓶的血液是红色的。根据一些学者研究，同样的错觉也曾发生在欧洲贵族的身上，他们认为自己的血是蓝色，因此发明了“蓝血贵族”的概念。其实，这不过是因为他们的皮肤呈半透明的奶油色，又不会因为在日光下劳动或是与有色人种通婚而变成深色。

卡维因对“福格特蓝”的治疗方法很简单，需要做的不过是给血液中

的铁提供一种电子给体——一种无害的染料就可以起到这种作用。在帕特里克和瑞秋·里奇的家里，他给两人分别注入了100毫克名为“亚甲基蓝”的生物染色剂——这名字颇有些讽刺性。他告诉特罗斯特：“几分钟内，他们皮肤的蓝色便消失了，他们人生中第一次变成了粉色。他们非常开心。”

皮肤与染料的颜色相似，这纯粹是一种巧合，但这却引起了病人们的注意。染料通常会通过尿液排出体外，据说有一位山民曾告诉卡维因：“我可以亲眼看到原来的蓝色从我的皮肤中出来了。”卡维因后来采用药物治疗替代了注射，因为这种治疗效果只是暂时的。

铁与血之间的秘密

对于每一个通过服用铁补剂来克服贫血症的人来说，铁与血之间的关联都是非常清楚的。在古代，赭石以及其他一些富含铁锈的矿石也常被视作血与生命的象征。铁对于我们的健康极为重要，这一点已广为人知；然而，铁既能服务于细胞也能破坏细胞的真实细节却很少有人了解。

举个例子——还记得大力水手吗？“我力大无穷，因为我爱吃菠菜。”这句广告语伴随着我们很多人长大。当父母教育挑食的孩子们也要吃菠菜时，最常用的理由就是铁这种金属与肌肉强壮的水手之间的直观联系。然而，最初促进菠菜在美国文化中推广的基础并非是补铁，而是补充维生素A——用以改善20世纪初儿童饮食中营养不良的问题。不知何故，这一信息在传播中被人们误解了。

事实上，菠菜的含铁量在蔬菜中并不算非常高，而且相比于红肉而言，植物性食物中的铁也更不容易被吸收。血液学家特伦斯·汉布林（Terrence Hamblin）曾给《英国医学学报》传统的圣诞幽默特刊供稿时写道：“大力水手可以将咀嚼罐头盒作为更好的补铁方式。”

那么铁究竟能不能对增强体质有所帮助呢？当然有了。我们知道，往铁里面加入少量的碳可以使铁变成钢，强度得到提升，而在身体中，却正相反：向碳化合物中加入一点铁，可以让你的细胞更好地发挥清理、运输、产生能量及免疫等作用。

这一切都源自于一颗依偎在一个舒适的分子篮中的铁原子。

你总会在生命的某一刻有意无意地看见自己的血是什么样子。或许你注意过它的颜色与铁锈很相似，并且猜测这两种物质都是因为铁在氧气的作用下变成了红色。在一定程度上这是正确的，但你还需要将血的颜色归功于血红素分子——一种存在于血红蛋白中像篮子一般携带着铁原子的分子。

血红素中由碳和氮原子构成的五元环及六元环可以与可见光发生共振并吸收掉其中一部分，从而显现出各种不同的颜色。擦伤中的黄色或橙色，就是源于这些分子环被破坏后的血红蛋白，被称之为胆红素，尿液的金黄色则大多源于胆红素的进一步分解。棕色皮肤的颜色来自黑色素，同样也是一种碳基的网状分子，同样不需要铁来帮助生成颜色。有时候，色素颜色代表着有机体的重要特征，例如黑色素，不仅是不同肤色文化的象征，也可以减少阳光中紫外线带来的伤害。不过在你的血液中，颜色主要意味着后者——血红蛋白的首要功能是让你活下去。

孤立地来看，血红素很像是一张小小的铁丝网——平坦、对称、复杂，并且从确定的中心向外辐射，携带着你身体中大部分的铁。围绕中心的是四个碳-氮环，每一个环都有一个氮原子指向内侧。当血红素在中心的位置挂上一个铁原子后，便可以从你的肺部接收氧气，并将它们送达你身体内的任意部位。

铁原子被血红素网住以后，就可以从血液中抓取氧分子了，然后再在需要的位置将其释放。当血红素位于血红蛋白隆起处顶端时，血红蛋白通过分子的卷须将氧气分子从上方压住，会有助于在艰难通过血管之时，保持氧气稳定。

没有血红素包裹的铁，你即使大口喘气，也仍然得不到足够的氧气，因为此时你的血浆只能携带极少量的氧气。你的每一个血红蛋白分子都带有4个血红素，而你的每一个红细胞中则含有大约250万个血红蛋白。在你手臂动脉中流淌的每一滴血，都含有数百万个红细胞，也就是说，数以兆亿的氧气正被铁束缚着，通过“红色运输线”来到你的手上。

如此高效工作的铁原子在你刚出生时，就已经开始向你的细胞运送氧气了，而且还将继续为你服务直到你离开人世。然而，如果你此刻还在子宫里，那它们现在的形式未必会如此高效——你的肺还没有开始工作，而且子宫里也没有任何新鲜的氧气。作为替代方式，你只能通过肚脐从你母亲的血液里获取氧气。这就需要一种特殊的胎儿血红蛋白（血红蛋白F），它们可以比成年人的血红蛋白更紧地抓住氧气。这种临时的措施可以允许你通过脐带从你的母亲那里获取氧气，直到你可以自行呼吸为止。

但是对你的健康而言，含铁血红素为你做的其他事与运输氧气同等重要。有一种令人不安的潜在危险可以证明此事，那就是氰化物的中毒机理。

用最简单的术语来描述，氰化物是通过窒息使人死亡的。中毒者失去血色的现象用医学术语来说就是“发绀”，这个词也是氰化物的词根来源（氰化物的英文是Cyanide，发绀是cyanotic），它描述了中毒后因缺氧造成的蓝色嘴唇。在溶液中，氢氰酸（氰化氢）的氢离子发生电离成为自由离子，剩下的氰离子就成为氧气的致命模仿者，与血红素结合得非常契合。

当氰离子像氧气那样与铁结合时，血红蛋白从你肺部运送氧气的过程就会减缓。然而更严重的损害将发生在细胞中最为偏远的角落里，也就是线粒体内。氰化物“别动队”可以将含铁的组件破坏，而那些正是生产能量的组件。

血红素携带着活性铁原子结合在细胞色素上，这是一种有别于血红蛋白的蛋白质，其中一部分驻留在你的线粒体中。就像大块的铁可以导电一样，血红素上的铁也可以通过细胞色素传递电子，从食物中获取化学能。这是一条严密的电子传递链，而氰离子通过与铁原子结合攻击了这一链条，使得电子的传递变得特别困难。没有了能量供给，你的肌肉与神经都将停止工作，你的心肺也会衰竭。

与人类一样，血红蛋白对于其他哺乳动物而言，同样是占据主导地位的血液蛋白；如果你发现烤架上的生牛排逐渐变成了棕色，那你观察到的便是血红蛋白变为met-H的过程。但肉的颜色也来自另一种含铁的蛋白质，即肌红蛋白。它们就像是肌肉细胞的氧气仓库一般，并且在煮熟时也会变为棕色。对你的细胞而言，氧气意味着能量，而更多的血红素铁也就意味着更多氧气，肌肉的力量也会因为肌红蛋白中少量的铁得到增强。

鲸、海豚和海豹在水下长时间屏息潜水时，会更多依赖肌肉中的氧气，很多海鸟也是如此。它们的肌肉中可以存储更多的肌红蛋白，从而呈现暗紫色。当你第一次碰到时，一定会对此大吃一惊。我可以讲一讲我自己的经历。

多年以前，我曾是奥杜邦协会生态营地的一名教员，驻扎在缅因州的海岸。在那里，我参与发起了对一座岛屿的寻访——一个世纪以前，该岛屿因过度捕猎，海雀已然绝迹，如今又重新被引进。自此我就习惯于认为海雀是濒临灭绝、需要营救的物种，但后来访问冰岛时我面对的却是一个道德困境——那里的人捕猎海雀作为食物。在雷克雅未克的一家餐馆用晚餐，我打开菜单时着实吓了一跳，我需要在牛排、三文鱼和烤海雀胸脯肉之间进行选择。细节就不说了，那个晚上我知道了两件事情：一是当我面对诱惑的时候，我可以是一名伪君子；二是海雀肉的颜色与葡萄酒很接近，味道也非常配。

在你的体内，大约有1/3的铁存在于血红蛋白与肌红蛋白以外的分子中。含铁的蛋白质可以构建并修复你的基因，代谢药物及毒剂，帮助产生激素，并且很多酶会将铁作为分割利器。例如，当已经无用的血液细胞需要被回收时，肝脏中的色素细胞就会将它们切成碎片。如果你曾经用过双氧水处理伤口，你或许会注意到它产生的乳状泡沫——这是过氧化氢酶的杰作，通过四个铁原子，保护性的酶每一秒钟都会将无数双氧水分子分解成水和氧气，避免双氧水伤害更多细胞。在身体组织的各个部位，过氧化氢酶分子都在做着持续的保卫工作，让你免遭危险化学废物的侵害，而这些废物通常是由你的代谢系统在体内产生的。

一名普通成年人体内大约含有4克铁，相当于三个曲别针那么重。在你的体内，铁可以被用于实现一些有益的目的，你的细胞也会将它作为一种武器。但有的时候，一个不恰当的操作却也能让枪口掉转，对准它的主人。

铁最具生物活性的状态被称为二价铁，二价铁很容易将电子转移给其他原子或分子。也是因为如此，二价铁又可以在某些细胞中的化合物跟前表现出很恶劣的行为，形成腐蚀性的自由基分子，损坏组织，并在伤口的位置妨碍血液凝结。当它受控时，铁对你是有帮助的，但只要1克不受控的二价铁，就足以将一个孩子送进医院。多数致死案例是给儿童喂食成人剂量的含铁补剂导致的，儿童典型致死剂量大约是3到6克（成年人的平均致死剂量约为10～50克）。根据《儿科》杂志的报道，在1983年至1990年间，美国有16名低于6岁的儿童因此丧命。

那为什么你血液中的铁并未置你于死地呢？这是因为大多数铁都被血红素或其他分子束缚住了，而你的细胞还雇用了一支“维和部队”，确保铁元素在完成任务时只带来最小的附带伤害。这类分子中最常见的一种是缠绕蛋白，可以包裹或直接吞噬铁原子。其中最主要的是铁蛋白，专门在细胞内部将铁隔离；还有转铁蛋白，可以在细胞之间传递铁。

你体内铁原子的破坏力当然也可以用于抵御致病性微生物。免疫系统的第一道防线用的是一种“焦土政策”，让入侵者断粮断补给。此时此刻，你只需要简单地用血红蛋白和其他物质将血液中的铁锁住，不让细菌的酶得到它们就行了。这不仅可以保护你，让自己远离危险的副作用，也可防止病原体利用它们来伤害你。红血球通常会限定你的血红蛋白，不过当它们最终瓦解或损耗时，任何泄漏出的铁都会很快被铁蛋白或转铁蛋白吸收。因此你的身体中几乎不会含有活性的游离铁，通常这是一件好事，因为无论如何你都不会希望看到它们在你身体里自由漂荡的。

然而，身体里异常缺乏游离铁也有不利的一面，这会让你暴露在微生物面前。当感觉到铁的浓度比体外环境低得可疑时，处于休眠状态的细菌基因便会突然启动。这会释放大量的蛋白质，窃取你体内的铁，并将其送到入侵敌军那里。

这些蛋白质攻击你的细胞是为了让它们释放含铁的分子。细菌表面其他一些特殊的蛋白质会将暴露的铁原子从它们的守护者身上撕扯下来，有时也会将整个分子吞噬。然而，另一种被称为“铁载体”的细菌产物，是与铁结合力最强的几种已知物质之一，它们像可食用海绵一样，将铁化合物吸收并控制，直到饥饿的微生物将它们整个吞噬。

波斯学者伊本·巴特兰对超新星与瘟疫间关系的猜测，其实应该从这样的原子级别来解释。鼠疫耶尔森氏菌是黑死病的元凶，它会释放一种叫作耶尔森杆菌素的铁载体，从受害者体内夺取铁。铁载体如此高效，以至于一些不致病的细菌甚至很多植物都会利用它们从含有铁锈颗粒的土壤中将远处的铁吸引过来。

不过作为受到攻击的回应，你自己的细胞还会发动第二波防御战。乳铁蛋白将游离铁的碎片全部清扫，并在细菌身上钻孔，杀灭它们。噬

铁蛋白跃到铁载体的“铁海绵”之上并将其覆盖，因此细菌就不能识别和吸收铁载体了。冲突进一步升级，于是入侵者会释放出更为狡猾的铁载体，不会很容易地被附着，而当炎症与感冒将你的身体作为战场时，情况会变得更为复杂。有些细菌如导致莱姆病的伯氏疏螺旋体，完全绕开了混乱的铁战争，将目标转向不太被关注或保护的锰原子，替代铁用于自身的新陈代谢。

很显然，虽然铁具有一些潜在危险，但对你来说还是非常重要，对于其他生物而言也是如此，这也是为什么你的食物里会有生物性铁的存在。同样，哺乳动物与鸟类都拥有血红蛋白和其他一些含铁的分子。至于菠菜，虽然它所提供的铁远不及《大力水手》动画片中描述的那样多，但它与其他蔬菜也含有该元素，因为它们自身的细胞色素还有自由漂浮的酶都离不开铁。浮游藻类会从海洋中的细菌性铁载体那里获取铁；苜蓿与其他豆类植物的根部生活着根瘤菌，利用富含铁的酶将空气中的氮转化为肥料，并与宿主一起产生了一种类型的血红蛋白，可以帮助细胞在地下完成呼吸。

这些联系，让你可以通过你吃的食物追溯到那些为植物提供铁的土壤，还可以继续追溯到地壳中的古老岩石，甚至可以追溯到太阳系诞生时的那次爆炸产生的星体尘埃。

关于铁的反思

纵观整个人类历史，我们一直都受益于铁的特性，不仅在血液与肌肉中，还有地球磁场，是地磁帮我们抵挡了宇宙射线与太阳风——太阳强烈爆发的亚原子粒子与能量，我的一个学生将其比作“愤怒的吹风机”——使我们的大气层不至于被吹到太空中去。随着冶铁与加工技术的提升，我们现在已经能够利用这种在恒星之中诞生的金属制造人体延伸物，就像早期的一些动物利用其他元素进化出外壳或骨架一样。

追本溯源，在亚洲与非洲正式开启铁器时代以前，只有很罕见的陨铁被用于装饰或工具。三四千年前，这种新技术在安纳托利亚被广泛使用，或许也在赤道非洲地区有所发展，在3000至2500年前传到了欧洲与中国，又通过贸易与战争传播到了世界的其他角落。在杨惟德与伊本·巴特兰的时期，铁器已经不再新鲜，基于很多因素，这个时代仍然持续了很久，直到被工业时代、太空时代以及数字时代所更替。但铁依然是世界上使用最广泛的一种金属，只不过多数是以钢的形式。根据世界钢铁协会的统计，2012年，仅中国就生产了超过7亿吨钢材，占全球总量的一半，相比客星SN1054出现的那个时代已是天壤之别，那时全世界每年铁的总产量不过几十万吨。磁铁被用于卫星与GPS零件、录音设备及音响、电吉他拾音器以及电脑硬盘。越来越难以想象，如果现代文明没有了电磁媒介会怎样，不过即便在它们出现以前，和一千年前相比，我们也早已更依赖铁和铁的合金了。

看看你衣服上的各种纽扣与拉链，它们都是由坚硬的钢针缝制；再看看书桌抽屉里的剪刀与订书器，让你进出房间的合页、门把手与门锁，将木板组合成屋子的钉子与螺丝，以及保持摩天大楼直立的钢结构。你的食物用钢铁器具加工出来，装上钢铁制造的卡车或火车，经过钢铁打造的桥梁，最终运到你面前并被你消费，而它们之前生长在用钢铁犁过的田地上。警察与军人配备着钢制武器，它们改进自中国古代用铸铁做的“火铳”“燧发枪”和“飞云霹雳炮”等武器。上述所有的这些东西，都是由工业钢具经过切割、拉伸、浇铸、钻孔和冲压等工艺加工完

成的，而冶炼这些钢铁时排放出的温室气体也在改变着大气的化学组成与温度。

就像铁会从正反两方面影响恒星与细胞一样，通过用其制造的越来越高级的，或用来创造或用于破坏的工具，铁也将继续服务或伤害我们。如何实现平衡？这将取决于我们对“原子联系”的理解能力，这种联系包括我们的原子与原子之间的联系，我们的原子与我们的地球之间的联系，以及我们的原子与太空深处的联系——我们都曾在那里遨游过。

我们制造的机器已经将人类送上了地球轨道，并且我们也已能够了解太阳系外的空间，一些曾经不可能抵达的地方看起来也越来越像是我们家园的一部分。我们现在可以正确地认识“流星”的闪光到底是什么，这些宇宙邻居的碎片并非真的消失了，而是与我们的大气发生摩擦，然后它们的原子融入了我们的空气、水以及土壤，甚至还有我们的血液。当夜幕降临，迈出家门，抬头望着星月，此刻我们可以更好地理解，那些遥远世界存在的种种物质，也在你我的身边和体内存在着。我们还将在科学前辈们打下的基础上继续前进，而我们如何解释这一切，又会做出怎样的反应，都将会在历史上写下独一无二的篇章。



我们的碳原子进入叶片中……就像昆虫被蜘蛛抓到了一样，它脱离了氧原子，又与氢原子结合……最终嵌入了一根链条之中，这条链是长是短并不重要，重要的是它是生命之链。

——普里莫·利维

（Primo Levi，意大利犹太裔化学家、作家，奥斯维辛集中营幸存者）

有机化学研究的是碳化合物，生物化学研究的是爬行的碳化合物。

——迈克·亚当斯

如果你的身体是由空气污染物组成的，你会怎么想？不管信不信，你身体的很大一部分已经是这样了。

想象一下你身体里九成的原子突然失去了颜色，剩下的那一成呈现幽灵般的半透明，那么现在的你就好像是一尊烟色玻璃的雕塑。如果你能想象出来，那么现在你将会看到在你的身体里嵌着800亿亿亿颗碳原子。令人难以置信的是，最近出现在你体内的碳原子中，每8个里面就有1个来自于烟囱和排气管。

到21世纪末时，燃烧煤炭、石油及天然气会向空气中排放更多的二氧化碳，因此我们后代身体中也会有更多的碳来源于化石能源。这是因为，植物会从空气中吸收二氧化碳，于是我们燃烧化石能源向大气中排放的碳，最终会通过全球的食物链进入我们体内。如果我们继续保持现有速度燃烧化石能源，直到剩余储量全部耗光，那么下一个世纪之后的人类都将成为“废气之子”，他们体内的有机质很大程度上来自我们排放的废气。

这些观点看上去有些古怪，但其实并非如此。我们都是由原子组成的生命，虽然我们乐于接受我们的某个微粒曾经在一个喜欢的人身上或地方待过，但同样的关系链也可能存在于我们和我们不太喜欢的人或地方之间。

当我写下这些文字之时，我周围的空气中大约每百万个分子中有400个是二氧化碳。当我的祖先在18世纪第一次踏上美洲大陆时，他们呼吸的空气中含有的二氧化碳要少一些，每百万个分子里差不多有280个。我们呼吸的这些多出来的二氧化碳，可以归因于过去这两个世纪燃烧的化石燃料。相比丰度高上千倍的氧气而言，这点含量微不足道，但就是这一小部分碳的氧化物却可以让巨大的冰冠融化，扰乱海洋的化学平衡，同样它们在你体内的比例也会增加。

我采访了大气化学家拉尔夫·基林，向他询问关于我们体内来自化石能源的碳的事。他指出，目前我们空气中大约1/4的二氧化碳都与人类活动有着密切的关系，有些是直接相关，有些则是间接相关。“气体总是会在海洋的表面溶解或逸出，”他解释道，“因此海水中的二氧化碳很容

易与我们释放到空气中的那部分进行交换。”他估算大气中的CO_2含量从280ppm上升到400ppm的增量由等量的两部分组成：我们排放的废气，以及废气从海水里置换出的分子。这也就意味着现代食物链中新增加的碳有一半——或者说你体内碳元素的1/8——都来自化石能源燃烧排放的二氧化碳，而另一半则来自于海洋中那些被替换出来的流亡分子。

在遥远的过去，小型农场中食物与废物之间的联系对一般人来说都很明显。田地为牛提供干草，牛为人类提供食物，并给田地回馈了肥料。工业文明的兴起以及城市规模的增长，让人们很难再看到他们吃的食物是如何生产的，以及他们的垃圾去了哪里。不过如今一些新的科学发现可以帮助我们弥补认知上的缺口，揭示实际存在的原子特性。当我们学会跟随体内外的各种元素来回穿梭后，我们便可以开始问一些更深刻的问题——关于我们与世界之间的联系。我们身体的一部分由含碳的废弃物组成，这究竟意味着什么？你的碳原子究竟从哪里来，它们在你体内做什么，又将往哪里去？这些问题的答案会令你大吃一惊。

没有人是一座孤岛

简单来说，你身体的大部分是由空气和水构建，但要想实现这一点，你还需要植物和光合微生物的帮助。你的每一条肌肉纤维、每一克脂肪与血糖、每一根骨头以及每一段基因，都是由碳原子搭建的框架，这些碳原子来自你身边的空气，但空气中的碳原子却和沙石河床里的金子一般稀少。不过这一小部分却非常了不起，当它们被植物筛选并以糖的形式储存起来时，就可以继续进入包括你在内的其他生物体中。

伴随着你的每一次呼吸，碳都会进入你的肺，然而只有当你吃下或喝下它们时，它们才会变成你不可或缺的一部分。从这个意义上讲，你是个绑架者，从其他生物那里绑走了碳原子。如果你能顺着原子供应链条，从盘中物回溯到农场与渔网，最终你将会碰到植物、海藻与蓝细菌。它们是连接你和空气中碳元素的入口，也就是地球上的初级生产者。

尽管模糊认定“所有生物都是有联系的”并不困难，但大多数联系用常规的尺寸、时间或距离的观点来看，其实并不明显。这种不可见性使得这些联系很容易被忽略，也很难被理解或相信。即便你的食物都是自己种的或养的，用原子的理念去思考你自己与环境的关系也并不寻常。所以接下来的一段时间就要请你“不寻常”一会儿了——如果你愿意，请想象一下你体内的碳。

两千万个碳原子挨个串起来也就能围住一颗罂粟籽，如果你试图看清其中一个，那无异于从地球上用肉眼寻见宇航员在月面尘埃上留下的脚印。然而，如果足够多的碳原子聚集到一起，它们构成的事物及现象就变得易于观察了。

比方说，当微风轻轻拂过脸颊时，你可以亲切地感受到含碳化合物的撞击，而且它们还有更多的来源。空气中弥漫的CO2分子大约有一百亿亿亿亿亿个，每一个分子都像是一颗碳原子两侧插着一对球形的氧原子翅膀。海洋学家保罗·法尔科夫斯基（Paul　Falkowski）及其团队曾在

《科学》杂志发表过一篇论文，其中报道海洋中含有的二氧化碳大约是空气中的50倍，而生物体内携带的碳元素则相当于大气中的2到4倍。一般来讲，一个成年人体内平均含有30到40磅（13.6到18.1千克）的碳原子。

一块纯净的碳可能看起来就像是黑色的脏东西，不过很奇怪的是，当你清理烟囱或锅底时从手掌上擦掉的黑灰，同样也存在于你手掌的内部。当然，在你还活着的时候，构成手的碳原子看起来完全不是什么脏东西，但如果从组织里将其抽取出来的话，它们也会是黑色颗粒。

这一点很重要，你体内的碳原子与烟灰中的碳原子其实是一样的，而且当死去的躯壳被火化时，体内有些碳原子真的会变成烟灰。你曾经遇见或听说过的任何人，你能想象到的从蠕虫到袋熊的各种生物，你电脑屏幕所使用的塑料、给你汽车提供动力的汽油，还有道路上的沥青，所有这些材料所含有的碳原子都一样。碳原子就好比是乐高积木块，可以用无限种方式堆积或连接，既可以构筑最简单的形状，也可以搭建最复杂的梦幻飞机。之所以可塑性如此强，关键就在于它们既能够彼此连接，也能够与其他元素连接。

一个典型的碳原子核中有6个质子与6个中子，有4个成键电子，可以与其他原子之间形成强力的共价键。任何一个碳原子都可以抓住两个同伴或是连着两个不同的原子嵌入一条长长的分子链中。通过这种方式，同样的碳原子却可以是无数分子的构成部分，就像是在舞台上同一个演员变换着不同角色。你睫毛上的碳原子同样也能够参与构建你眼中的透明角膜蛋白或识别视色素。在遥远的过去，它们或曾织就过世界上第一张蛛网，或曾让始祖鸟的彩翼熠熠生辉，又或曾让史前鲜花吐露出缕缕芬芳。

认识到碳化合物存在并不长久的本质有助于缓解你的焦虑感，毕竟你体内那些来自化石能源的碳原子，要是还保留着臭气熏天或烟雾缭绕的特性，会让人很苦恼的。如果用更长远的眼光回顾历史，你会发现这些曾经属于煤或石油的碳原子，更早的时候也许是待在秀美的森林或原始的海洋中。当原子参与构成新的分子时，先前形式的性质也会消失，所以无论你早餐麦片中的碳原子最近在哪里待过，都没有什么实质的区

别。对它们来说，每一个新的分子都是一次新的开始。

你体内的原子也许曾经历过穴居熊的呼吸或是其他前身，但这些记忆并不会让它们分心；同样，那些排放物中的碳原子，现在成为你肉体的一部分之后，对你的健康或容颜也没有直接影响。人类的身体一直都在由过去其他人或事物使用后又丢弃的碎片回收再利用而成，从这个意义上讲，我们都是“活着的死者”。但我们对这种原子级别关联的认识，让我们更容易想起我们祖先早就有了的直观概念：没有人可以真正与世隔绝。就像17世纪的诗人约翰·多恩（John Donne）所写的：“没有人是一座孤岛，可以自全；每个人都是大陆的一片，整体的一部分。”

古代人或许会更容易感受到他们与土地、水和空气的联系，也会更容易感知他们生活中的自然限制。如今，我们似乎已经忘了超市并不生产它容纳的商品，也会认为下水道与垃圾桶是什么都能丢进去的无底洞。

在这种环境下，认识到你体内存在着化石燃料碳原子就成为很有价值的体验了，不是因为它们会直接伤害你，而是因为它们会把你和气候、生存环境以及全世界的所有人都联系起来。然而更让人头疼的还是那些有害物质，它们可能会伴随着那些碳原子，成为你身体的一部分。

例如自然界的煤通常含有少量水银，美国环境保护局（EPA）估测，自1990年起，仅美国的燃煤电厂每年向大气中排放的汞就超过50吨。有毒的汞如今已是高度扩散，甚至公海中剑鱼体内的汞浓度比EPA认定的食用不安全上限（0.3ppm）还要高出三倍。EPA近期的另一项研究还发现，超过100万美国育龄妇女的血清与头发中所含甲基汞浓度超标，这也使得超过75000名新生婴儿有可能因为在子宫中吸收汞导致神经损伤。

我们身体的碳平衡所发生的变化，说明我们居住在一个有限的世界，并且被它深刻地影响着。在这个原子构建的疆域里，物质只会被回收或重构，而不会真正地被创造或毁灭。当我们去处理生活中产生的垃圾时，应当要牢记，至少在这个地球上，并不存在什么地方是我们可以将它们永远“扔掉”的。

自然界的流通货币

尽管含碳化合物具有惊人的多样性，但它们也有一个共同的特征，那就是都可以被分解。这个过程可以是微生物降解，也可以是被消化，不过最简单的方式还是加热。任何一种含碳化合物被投入熔炉中，只要温度足够高，它都会被氧化成一团气体。只要你舍得为科学做贡献，就连钻石也可以被点燃——19世纪初期英国化学家与物理学家迈克尔·法拉第就记录过这一实验："在黑暗中，钻石发出明亮的红色光芒，偏向紫色，持续燃烧了约4分钟。"

为了观察原子转化，证明相关原理，相对于钻石，我更推荐你烧一些并不昂贵的有机化合物。当然，你肯定见过这种现象，比如在火炉里或是点燃的烟头上，不过如果你用心观察，它呈现的却又是另外一回事。我时常带着学生做这些观察，以证明生命的元素特性。我自1987年起就在保罗史密斯学院教授自然科学，这所学院位于纽约州北部，植被茂密，校园里有很多香脂冷杉树。我最喜欢做的一件事就是用身边的这种树做例子。

上一次证明这一观点时，我从树梢上折下一根干树枝并讲道："看到这根树枝了吗？它看上去不像是一堆碳原子，但它确实是。我们只需要借助一点魔力……呃，谁有打火机？"

树枝发出噼啪的声音，冒着烟，片片炭屑和灰烬落到地上，我从学生们的脸上读出了信息，那就是他们已经理解了这场展示要教给他们的一课。这些原子也是构建我们人体的原子，而且有一天我们也都会经历和树枝一样的命运，或许是烈火，或许是更为缓慢的腐朽过程。

"我们刚刚拆解了一整个季节的阳光、雨水和山间空气，"我继续说道，"这块黑色木炭是纯化的碳，大部分其他原子都已脱离。灰烬是树木从土壤中获得的矿物质。然而，此刻这根树枝的大部分都在以二氧化碳与水蒸气的形式被吹散到树林里，我们下风口的树木此刻正在吸收着这些碳元素，生长为新的树枝。如果将来有鹿群从这里经过，也许其中会

有一头小鹿将这些嫩枝作为点心；到了明年，或许你们当中有谁猎到这头鹿，将它做成下酒菜，这样，这些碳原子就会成为你们的一部分，不过也只是暂时的。”

当然，你永远都不会知道，这种时候学生们会如何回应。当我暂停片刻，让他们好好消化这些内容时，一个小伙子发问了。

“如果这些树可以将二氧化碳转化为树枝，是不是它们也能把我们呼出的废气转化为树枝？”

“当然了，”我回答道，“非常好！我觉得你已经弄清楚重点了。”

“所以如果明年秋天我吃了鹿肉，”他嘴角闪过一丝狡黠，“是不是也算是在学习，因为我也吸收了这堂课上的一些热空气。”

无须多说，我们都很享受在保罗·史密斯校园内的这种活跃气氛。不过当我们被他的玩笑逗乐时，我也发现这一层幽默也恰恰展示了这小伙子对自己原子本质的认识，毕竟他最后的推测还是对的。

在生物与非生物之间，有一扇旋转门立于其间。在陆地上，植物从空气中吸取二氧化碳，将它们的原子重新编织成糖类分子，用于搭建细胞结构和储存能量。相关专家估测，每年大约有1200亿吨碳原子会通过植物茎叶完成循环——大约相当于大气中气态碳原子总量的1/6。很多碳原子并没有发生变化，又重新扩散到了空气中。不过就算是那些成为汁液或种子的碳，迟早也都会以CO2废气的形式回到空气中，要么是植物自己来排放，要么是其他以植物为食的生物来排放。

更简单来说就是，大气会变成我们，而我们也会变成大气。我们的细胞将不可见的原子编织到身体里，然后又将它们释放到一个极其富裕又环环相扣的“生命经济体”，其中的流通货币就是碳。

你所吃下去的大多数含碳化合物，都会变成保持身体机能和恒定体温所需的能量，其中只有大约1/10会成为构建身体的材料。在你细胞的“代谢工厂”中，碳原子在食物分子中发生松动，成为二氧化碳后自由飘荡，随着每一次呼吸而被释放。但是与熔炉不同的是，你摄入氧气与呼出二氧化碳之间的关系并没有那么直接。

你的呼吸循环是一曲非常复杂的二重唱，一个声部是氧气消耗的一系列过程，而另一个则是含氧食物的分解过程。这样的结果就是，护送碳原子从你的血液中出来的氧原子，大都不是你刚刚吸入的那些，不同于你望着壁炉所猜测的那样，从房间一头吸进空气，同时在烟囱那头排出烟尘。刚刚吸入的氧原子会经过代谢变成水，而呼出的CO_2中，大部分氧原子是通过胃而不是肺进入你体内的。细胞会将你刚吃的那片面包撕碎，所以你更可能是将它们呼出去，化作阵阵轻风回到它们曾经生长的那片明媚麦田，而非将它们排泄出去。

你也会把自己呼出去。你体内的细胞在不断进行修复与置换，很多有机物会在你体内消化酶的咀嚼下被终结，然后随着其他从食物里产生的废气一起从肺部排出。

从原子的角度来观察，你就是一团构成异常复杂的压缩空气。所以，大气组分的变化势必也会改变你身体的组分，这根本不奇怪，而且在如今越来越拥挤和工业化的世界中更是如此。我们不仅仅会被空气污染所影响，更深层次讲，我们就是空气污染。

CO_2的穹顶之下

戴安娜·帕塔基（Diane　Pataki）很清楚，当人口数量达到相当庞大的规模时，空气对于人类排放废气的反应会有多敏感。她是一名环境生物学家，就职于加州及犹他州的多所大学，曾协助建立了一个生态研究课题，在大城市这种新型的生态系统中，追踪原子的运动。

《地球物理研究快报》曾经刊登过帕塔基的众多作品，其中2006年的一篇文章描述了在大城市内部及周围，空气对人类活动的反应是如何迅速。随着人们行为的变化，原子比例每个小时都会发生波动。通过这种方式，空气记录了我们的影响，帕塔基与她的团队也揭示了我们作为一个整体是如何影响大气的。

被作为研究对象的生态系统是犹他州的盐湖城，但在其他城市中心进行的研究也揭示了类似结果，这其中包括：洛杉矶、菲尼克斯、巴尔的摩和巴黎。因为传统的生态学家都将目光集中在野外，因此这项研究中的一项发现直到最近才引起生态学家的注意，那就是城市居民与机器制造出的富碳气体罩，帕塔基与同伴们称之为“城市CO_2穹顶”。

这个词用得颇有些不当，“城市CO_2穹顶”并没有确定的形状，内外之间也没有明确的界限。它很像是一个没有橡胶层的气球，内部充满了人们呼出的富碳废气，其密度一般比空气更大，因此更倾向于贴在整个城市的地面上，形成无定型的隆起。模糊的边界会化掉并随风飘散，底层则会不断补入废气。

每一座大城市都有一个这样的穹顶，不过大小形状和构成比例就各有不同了，取决于当地的环境与文化。比如洛杉矶的CO_2穹顶因为受太平洋的西风影响，被压缩到了周围的山坳中，而上方被一层空气封住，因此城市废气不会向上逃逸。它会有节奏地膨胀或收缩，当太阳照射使穹顶中的空气升温时，垂直方向的厚度可以达到大约半英里（800米），到了晚上差不多就只有一半高度了。

盐湖城的地势更为开阔，城市上方的穹顶边界没那么清晰，可以在不同的气象条件下更为自由地摇晃或扩张。但是在穹顶内部所发生的一切，则最为清晰地展示出人类与空气之间的原子关联。

在2004年12月到2005年1月间，帕塔基和她的同事们分析了盐湖城内部与周边空气的化学及同位素平衡，发现穹顶内每天都会出现两次CO_2浓度井喷的现象，第一次是在黎明前的几个小时，到了下午邻近傍晚时又会再次出现。通过分析烟雾中的特征同位素指纹图，该团队可以追踪穹顶中额外的碳原子，判断在确切时间化石能源的燃烧增长情况，这也反映了当地居民的生活习惯。

第一次高峰多数是由寒夜里的天然气取暖所致，而第二次增长则是因为上班族们被堵在了路上。然而令人惊讶的是，有时大约会有一半的二氧化碳来自于人类与机器之外。温暖的夏夜里，主城区中的树木、草坪、花园甚至半裸露的土壤，都会因为微生物的降解与植物呼吸释放出大量CO_2。而当太阳再次升起，植物开始进行光合作用后，穹顶中的CO_2浓度也会随之下降，就像全球大气成分随着季节变换而变化一样。

一家名为SLCO2的网站会登出犹他大学的数据，显示盐湖城上方的CO_2浓度通常是在工作日更高，这应该是因为工作日行驶的车辆更多。二氧化碳浓度在白天会上升，而这段时间人们与机械的活动也更为频繁，从大量监测站所获取的周数据看上去都像海浪一般。最高浓度出现在人们打开家中壁炉的时候，而冬天的寒冷会使得穹顶无法过度膨胀，这样排放物就会被限制在更小的范围内。

或许你已经猜到，在人口最为密集的地方，二氧化碳的浓度也会异常高。最近，波士顿大学的科学家发现在他们的城市里，CO_2的浓度通常会比郊区的哈佛森林（平均393ppm左右）要高出20ppm以上，而森林不过位于城市西侧一个半小时车程而已。熙熙攘攘的科托努是中非国家贝宁的一座城市，研究发现这里的CO_2浓度超过世界平均水平的两倍，这要归因于当地的交通、家庭与工业排放。科学家们在监测印第安纳波利斯的空气时，发现当地近期的CO_2浓度突然上升，他们非常惊讶，直到后来才想起，当时正逢印第安纳波利斯500英里大奖赛召开。不过这种突增并非是由赛车所致，而是来自于数以十万计的观众前往小

镇观赛时所开的车。

在这样的穹顶下，居住着全美3/4的人口，那么一切是怎么与我们的生活息息相关的？大城市空气中的有毒污染物威胁人体健康，这已广为人知，但此处要关注的并非这一点。故事主角是巨大穹顶中的碳原子，而不是可能由它们产生的肮脏化合物。在这些化合物中，无色无味的二氧化碳最为常见，而它在城市穹顶中的浓度尚不足以从生理上危害到任何人。

事实上，科托努CO_2穹顶中双倍于一般地区的碳，似乎也确实促进了当地植物的繁荣。根据前述研究，城市中污染最严重的地区，草会以废气作为生长原料。在科托努嗅一嗅花朵的芬芳，香郁的气味分子中有1/5的碳原子就来自不远处的轿车、卡车和烟囱。

尽管植物会在富含二氧化碳的大城市中感到陶醉，但我们可不喜欢这样。当我们吸入二氧化碳时，我们仅仅是原封不动地把它们又呼了出来，还加了我们自己产生的那部分。不过这并非是说城市中的碳完全不会影响我们，事实与此相去甚远。

大城市中CO_2穹顶中的大部分碳都来自空气以外，在南太平洋的岛屿和北极苔原上你也可以发现同样的物质。大气中大部分二氧化碳，依次来自于生物圈、火山喷发与海洋逸散。但是在城市CO_2穹顶中，大约有1/4来自化石燃料。

这也就是为什么戴安娜·帕塔基这些科学家的工作如此重要的原因之一。说起温室气体的排放，城市区域已然是我们与大气之间的主要纽带。自从工业革命以来，全世界的二氧化碳浓度一直在上升，并且到本世纪末，将会达到工业革命以前的两倍。尽管仍然有人否认人类是这一次上升的幕后推手，但数据却说明了一切。

是的，森林中发生的火灾及降解过程都会向空气中释放CO_2，但在20世纪，这些原因所贡献的比例很小。此外，同位素分析表明，增长的那部分主要来自于化石燃料而非生物性碳。

是的，相比过去而言，增长的大量人口也向大气中呼出更多的

CO_2，但在城市CO_2穹顶中，这也只是很小的一部分，通常在1%左右，对于整个星球而言更是微不足道。

是的，火山会喷出二氧化碳，但即便很活跃的火山，比如菲律宾的皮纳图博火山或华盛顿州的圣海伦斯火山，也只是在一段时间里影响局部地区。然而另一方面，我们的影响却是全球性的，并且无休无止。在地球科学时事通讯《EOS》上刊登的一篇文章中，火山学家特伦斯·格拉赫（Terrance Gerlach）用质朴的术语说明，火山排放出的CO_2不足人类排放的百分之一。根据他的计算，我们排放三天，就相当于全世界的火山排放一年。根据格拉赫的数据，我们目前每年大约排放350亿吨二氧化碳，相当于700次皮纳图博火山喷发，而像圣海伦斯火山在1980年那样的爆发，需要至少每天9次才能赶上我们的排放量。

就像格拉赫指出的，将我们自己和地球上最强大的几种力量对比，“是揭示人类碳足迹规模的生动视角”。而另一方面，通过煤炭、天然气和石油向空气中无休无止排放的碳，正在将我们的整个大气层改造成一个巨大的CO_2穹顶。

令人震撼的二氧化碳浓度地图

我们排放的碳，巨大的数字虽令人印象深刻，但给人的感觉还是很抽象，在地图上精确观察大多数碳排放发生的位置，则会更加令人震撼。

基于卫星监测到的数据，国家海洋与大气治理署的一个网站“碳迹追踪者2011”（CarbonTracker CT2011_oi）用彩色地图展示了全球的二氧化碳浓度。点开其中一个链接，你可以看到美国中部地区在夏天会变为蓝色，因为粮食作物和森林从大气中吸收了碳，到了冬天又会变为红色，因为土壤中微生物的降解释放了碳。点开其他链接，你也可以看到，随着季节变换，植被的作用促使南北半球在蓝色与红色间交替变化。图像展现了很多细节，你可以观察到局部二氧化碳形成的旋涡与混沌，就像咖啡中的奶油一样。

要想观察复杂的人类社会如何对头顶上的空气造成影响，可以查阅美国能源信息管理局最近几十年的全美二氧化碳排放图。在2009年美国经济陷入混乱以前，碳排放每年都在增长。数百万资产缩水的人们缩减了旅行及消费开支，他们排放的碳也减少了。经济学家与政治家可以很好地根据这张图评判国家运行是否健康，就像医生监测病人的呼吸一样。大衰退期间碳排放的减少，就好比是经济出现问题后的浅呼吸。在写这本书的时候，美国CO2曲线又爬升到了之前的水平，因为经济正在缓慢复苏。

根据上述这些观点，局部与全球之间会无缝对接。就像基林和其他一些科学家展示的那样，低层大气会在一年左右完全混合，所以全世界的监测站都会观测到CO2的类似增长。地球上的生物给这条上升的曲线增添了些许波动，这是因为生物圈大量光合作用与呼吸引起的季节脉动，夏天吸收而冬天排放。但是不管怎样，全球二氧化碳的总量还是在持续上升，主要归功于北半球的部分地区。

二氧化碳信息分析中心公开的地图上，用鲜明的颜色标出了热点地

区。从上面可以看出，美国东部、欧洲北部、印度及中国就像看不到火焰的火坑。在这些热点地区，是世界上规模最大的城市工业CO_2穹顶，作为主力向大气中排放着化石碳。因为这些碳源集中在北半球中纬度地区，北半球的空气监测站现在测得的数据会略高于南半球。在化石能源时代以前，相对多地少海的北半球而言，海洋的上升洋流会造成南半球的二氧化碳浓度有所富集。如今这种不平衡已经发生了逆转，仅仅是因为北半球拥有更多城市。

你可能已经知道，二氧化碳会使大气变暖。或许你还知道，因为碳原子与氧原子的排列方式，CO_2分子与红外线的频率之间存在共振，从而使得这种气体具有超强的热量获取能力。这些信息很容易就能查到，所以如果你想温习什么是温室效应以及CO_2持续增长如何影响着全世界，海量信息在等着你。

全球变暖的糟糕影响或许已经令你沮丧至极，甚至想跳出城市CO_2穹顶以外，不过我们在这里更关注的还是背后的原子关联。了解这些关联，我们也就可以更深入地理解我们对地球的影响——延展开来，也是对我们自己和后代的影响——而且还会揭示一些令人振奋的事情。就碳元素而言，从原子的角度可以展示出，无论是正面还是负面，我们与地球的关系到底是何等密切。

化石燃料是我们深埋在地下的亲戚

当我们谈论诸如煤炭、石油与天然气这些化石燃料时，我们真正谈论的其实是化石。

比方说，当你抓住一块煤炭时，你在手中握住的这些碳原子，也许是死去很久的树木、草本和苔藓，或是原始沼泽或湿地森林中有机质浓缩而成的精华。这也就是为什么煤炭可以燃烧的根本原因——在原子层面上，它很像是纯化的木柴。经过漫长地质年代的分解，深埋于高温高压的地下，重构之后的植物残存组织只留下环状紧扣的碳原子和一些生命元素，两者比例为9:1。碳原子采用蜂窝形式紧密堆积，曾经棕色或绿色的纤维组织也逐渐变成深黑色的石块。有的时候，原始植物会形成一块幽灵般的平板，保存完好，其中的细节还能让专家鉴定它们的品种。

相比之下，石油是液态的，其中流淌的是一些富含碳原子的分子链。对于石油而言，主要的碳源是海洋浮游生物。陆地上的植物可以用糖或淀粉储能，但这两者会在遇水时发生溶解或膨胀，因此藻类将它们的碳原子构建成不亲水的油滴，相当于人类体内的脂肪。当它们死亡之后，细胞会沉积到海床上，在那里它们被反复挤压熬煮，最终纯化成为可燃的液体。

三大化石燃料的最后一种是天然气，它的迁移能力最强。甲烷分子，是单个碳原子结合了四个氢原子，而丙烷是一条短短的碳链，上面也布满了氢原子。新近被掩埋的植物及浮游生物会滋生细菌并产生天然气，直到不断增加的温度和压力将它们也一并杀死，而留下的天然气则会藏匿在煤炭的缝隙里或油田内部。

介绍上述这些细节，所要表达的重点就是，从原子层面看，化石燃料其实和我们一样，都是生物圈的杰作，主要区别不过是它们的碳原子已经在层层厚重的岩石下被隔绝了数百万年之久。对我们而言，化石能源的碳原子就像是失联很久的亲戚，我们从未听到过有关它们的消息——直到现在。

据推测，深埋地下的化石性碳含量大约是目前碳循环过程中的两倍，也就是说，在漫长的岁月里，一座巨大的有机物仓库在地下矿床上被建立了起来。现在请你想象一下，如果它们像拉撒路（圣经人物，经耶稣救赎，被埋葬后死而复生。——译注）一样从坟墓中复活，重新转变为生命会怎么样？当然，你并不需要把这个过程限制在想象的世界里，因为你可以真实地看到、听到、尝到、嗅到或感受到这一切，因为这一切正在你身边甚至你的体内发生着。

很多人都会同意诺曼·梅勒（Norman Mailer，美国著名作家）的观点，他曾在作品中这样描写石油产品："我们把自己从土壤、岩石、树林和矿石中的成分中剥离出来；我们寄希望于在大桶里煮出来的新材料，也就是尿液漫长转化之后的复杂衍生品，我们称之为塑料。它们已没有生命的气息……它们的触感与本性格格不入。"但如果用原子的观点审视现代世界却会更为微妙，土地、海洋和空气中的元素依旧渗透到了我们的生活之中，即便是在城市中那些看起来最不自然的一面，也比你的想象更加野性。

为了说明这一点，我们不妨去拜访一下麦当劳。

无论对它是爱是恨，麦当劳的金色门廊标志都已遍布世界各地，接待着数以十亿计的顾客，以至于麦当劳品牌已经成为西方文化的象征，而这一切皆源于20世纪40年代位于加州圣贝纳迪诺的一家独立烧烤餐厅。这也是我们探访碳原子的主要地点。

在这个思维实验中，你将车子开到停车场并熄火。你的汽车引擎此刻已不再燃烧我们称之为汽油的海藻碳；随后你便下车，站到了黑色的硬质路面上——沥青是一种黏稠的液体，其中的碳链和碳环是喜光的海洋浮游生物在几百万年前编织而成的，为了使其稳定，人们在其中掺杂了一些鹅卵石。

接着你走向柜台开始排队，基于石油的树脂地板因为表面的浮游生物蜡而熠熠生辉。地面很滑，你的脚不由自主地使劲，鞋子中那些由海藻碳构成的聚合物因为压力而吱吱作响。你面前的墙上挂着五颜六色的面板，透过一层透明膜可以看到里面的菜单——这层膜也是有机物，其中的碳原子是由原始浮游生物从海洋与空气中攫获的。餐厅内灯火通

明，而这是因为电厂正在用古生代森林的碳作为能源发电。

“小薯条，一杯可乐，谢谢。”

薯条在碳基食用油中嘶嘶地冒着气泡。这些食用油一般由玉米、花生或大豆加工而成，货车燃烧着精炼的古海藻（汽油）将它们运输到此，随后的烹饪则是在阿帕拉契亚山脉远古森林（煤炭）提供的能量下完成的。当它们被递送到你的手里时，外面包着一层由木浆纤维（纸）制成的袋子，似乎还有点起皱；而要想更好地享受美味，你还需要蘸一些富含碳元素的西红柿果酱（番茄酱）。你手中的可乐正在沙沙作响，它是由微生物排放的废气（天然气）与水蒸气反应而来，这种软饮中的甜味则是来自一种热带草本植物的茎（甘蔗）。

然后你用什么付账呢？还能是什么！是由阿拉伯沙漠中发掘出的海藻碳（石油）制成的一种弹性薄卡片，然后你就该继续上路了。

现代社会能否从自然中孤立出来？非常难。之所以觉得孤立只不过是一种错觉，认为稳定存在的原子会快速消失。即使在地球上最人工化的一些地区，碳原子仍然将你和现代以及远古的很多有机体联系起来。从这个意义上讲，塑料和它的近亲们并不比羊毛（由绵羊将牧草的分子转化而来）或木头（由树木将空气和水转化而来）更不天然。

从严格的原子角度来看，喧闹的城市同偏僻的热带小岛倒有许多相同之处。车辆与建筑的窗玻璃是熔融过的沙子薄片；墙面、地基和步道是粉碎的石灰质矿物质，从远古时代的海床挖掘而来。根据这些，你的思维还可以更天马行空一些，将摩天大楼看作是转世而来的珊瑚礁，那些店面就好比是滤食性的珊瑚虫一样，而熙熙攘攘的人流就是它们获取养分的“浮游生物”。所有这些人工建筑都是由回收的材料构成的，我们出于自身的目的对它们重新加工，跟微生物、植物还有动物几百万年以来一直做的事情一样。

这当然并不是传统的思维方式，而且也很容易被误解，因此有必要做一个简单澄清。通过原子的角度来揭穿人类社会孤立于自然的假象，并不是为了给我们特权，让整个世界都变成我们的游乐场。根本不是这样！相反，这是在提醒我们，跟其他任何物种一样，我们不会在自然法

则中获得豁免权，如果我们忽视了这一切，只会让我们自己身处危险之境。

随着越来越多的化石碳重新回到了大气循环之中，你与食物之间的元素关联还可以追溯到更遥远的过去。不妨拿起你的番茄酱——如果这些西红柿是在加州中央山谷农场生长的，那么这其中的很多碳都来自洛杉矶与旧金山的城市CO2穹顶。目前，加州的汽油大约一半是自给自足，剩余部分主要来自阿拉斯加。所以，每一滴番茄酱中都携带着来自远古藻类的碳原子，它们曾经生活在太平洋或北冰洋中，又在地下沉睡了百万年或更久。你吃掉它后，这些碳原子会在你的体内待上一阵子，然后又会逃逸到海洋或大气中，在那里它们曾经漫游过很多次。

利用稳定同位素，科学家最近开发了一种方法，可以通过连锁快餐店的菜单对你和地球之间的原子联系进行追踪，有时甚至可以使用标志性的巨无霸汉堡作为这个星球上古老生态食物链的新代表。在文化与饮食日益趋同的前提下，他们的发现与我们大多数人的期望相违。

在开始探索汉堡里的碳原子如何将你的身体与世界相连之前，先想象一下，你现在穿越到遥远的7000万年前，来到如今属于南卡罗来纳海滨的地方。在这里温暖而清浅的海水之下，你准备探寻一种具有十只触手的生物，它的碳原子对于揭开你自己的原子秘密来说具有重要意义。

用碳13追踪你与世界之间的联系

箭石很像是一种小型乌贼，或者说“曾经”是（箭石是一种生活在泥盆纪至白垩纪的软体动物，鞘容易保存为化石）。不过如今当你把箭石化石放到掌心，它看上去却更像是一颗大号子弹。箭石已经灭绝了数千万年，与恐龙一同在中生代末期消失，它们尸体的大部分都是含碳的小圆柱形方解石或霰石，这也让它们的尸体发生硬化。当箭石外层的石灰石被切开后，它们的流线型外形会更加清晰，内骨骼看起来也很优美，而你或许已经在墙上或是书架上见过它们了。不过你的碳原子与一个箭石群落之间还存在着特殊联系，因为它们的化石被作为同位素标准品，科学家可借此测算饮食与污染对人类及生态系统的影响。

几十年来，科学家们从南卡罗来纳皮迪河（Pee Dee）的海相沉积物中挖掘箭石，研磨并清洗之后，发现这些石灰石中，较重的碳13同位素与普通的碳12原子含量比为1.11%。这个值被用来作为国际碳同位素标准（PDB）。但地质化学家使用了太多的皮迪箭石，以致如今箭石已经耗尽，因此在1994年一个新的标准被启用，即VPDB标准（Vienna Pee Dee Belemnite，维也纳-皮迪箭石），以此作为同位素基准，用于测量所有含碳对象，其中也包括人类。

如果取一根头发送往同位素实验室进行分析，你会发现，相比工业革命前的估测数据，如今的碳13的含量更低，而这一差异也印证了我们给文明社会提供能源的方式。就像今天的植物与浮游生物一样，煤炭、石油和天然气的那部分由光合作用而来的碳，其中的碳13含量比水与空气中的含量低；同时，通过改变大气与海洋之间的平衡，燃烧化石能源排放的气体正在降低地球上所有生物的碳13含量。体内带有碳污染物的想法不仅仅只是一个理论抽象——通过将你失衡的同位素比例与中生代“乌贼”进行对比，你可以证明这一点。

化学家们用重轻同位素比来表示你头发中的碳13含量，并标记为“δ13C”，其发音是“德耳塔碳13”，接着根据箭石标准对这个数值进行修正，负值表示碳13的含量比皮迪箭石要低。你可能会发现你的δ13C

在-15‰到-25‰之间变化，更精确的数值还取决于你所在的位置以及所吃的食物。而这，不管你信不信，又将我们带回到了麦当劳。

生态学家路易斯·马蒂内利（Luiz Martinelli）及其团队在2011年的《食品化学》杂志上发表文章，对快餐导致现代西方饮食严重同质化的观点提出质疑。为了证明这一点，他测试了全球各类常见食物的同位素比例，并通过汉堡重建了人类与其原子最初来源之间的原子联系。

他在文中写道："消费者可以在大约120个国家超过32000个门店购买到同样的巨无霸，这在人类历史上还是第一次出现。"这一局面通常被作为饮食全球化的论据，但马蒂内利的团队指出，巨无霸的配方在全世界范围内一致，但真正的组成部分反映的仍然是食品原料产地本土的同位素环境。他们将这种全球与本土的混合特征称之为"全球本土化"。

为了更好地理解全球本土化，最好先回忆一下食物中的原子从何而来。巨无霸中的碎牛肉当然来自于大批量的牛，也许是国内养殖的，也许是进口的。举例而言，纽约或芝加哥的麦当劳，牛肉很可能来自美国本土，但阿姆斯特丹的大多数牛肉则由其他国家生产。也就是说，无论身在何处，你点的都是"双层牛肉饼"，但牛肉本身却不像配方那样全球统一。

牛的同位素比例取决于它所吃的植物，而不同植物中不同的碳痕迹又取决于植物的品种以及它们生长的环境。例如，玉米和甘蔗，δ13C的数值（-10‰到-15‰）就比小麦和大豆（-20‰到-35‰）要高，这其中既有基因的因素，也与植物生长环境有关，生长在相对温暖而干燥的地区，例如大平原地区或墨西哥湾沿岸，植物都会倾向拥有更高的数值。

在马蒂内利与他的团队测试了26个国家的牛肉饼δ13C数值后，他们也发现了这些牛肉原子受控于产地的明确依据。巴西与美国麦当劳的牛肉相比苏格兰及奥地利来说，数值明显高出不少。这在很大程度上是因为巴西的牛是在热带草原放养，美国的牛则是以玉米作为饲料，这两类植物的碳13含量都比苏格兰与奥地利用作饲料的干草或大豆更高。日本汉堡的同类数值与巴西接近，这似乎并没有像预料中那么低，因为日本的气候相对更为潮湿温和。不过日本也大量从澳大利亚进口牛肉，那边的气候则更为炎热干燥。尽管在全世界来说，巨无霸无论看上去还是吃

起来都差不多，但它所含的碳原子则显示，它还是远比看起来更为本土化，或者说全球本土化。

不必惊讶的是，饮食、地理位置以及生物之间的原子关系也会延伸到你身上。

在马蒂内利的成果基础上，犹他州与印第安纳州的一组科学家继续深入调查了全球食品对欧美居民的影响。他们走访了14个国家，从理发店的地板上以及志愿者的头上收集了碎发。随后发现，无论快餐与超市连锁店如何普及，他们身上的同位素信息仍旧抹不去故乡的痕迹。他们在2012年的《公共科学图书馆期刊》发表了一篇论文，指出喜欢快餐的美国人头发中碳13的含量比欧洲人多，一部分原因就是美国饲养的牛多数以玉米为食。相比芬兰人与瑞士人，葡萄牙人δ13C的数值也更高些，很可能是因为他们的食谱中有更多的海鲜，他们消费的蔬菜与谷物也生长于干燥温暖的地中海气候中。

作者最后总结，他们的数据“在样本国家采集到了饮食在地理上的结构性差异”，虽然表面上看起来它们是一致的。尽管我们大多数人都不再利用身边动植物原子来构建并维持身体，但是通过这些有机物，食物链的同位素标记仍然将我们与特定地区联系在了一起。

人类饮食在原子层面的变化如今已超越了物种界限，影响到我们身边的动物。2010年，《哺乳动物学报》上刊登了一项发现，怀俄明大学和其他一些机构的科学家们介绍道，濒临灭绝且罕见的沙狐经常出没于加州贝克斯菲尔德市的巷道与后院中，在它们体内也观察到了同位素变化。

直到近期，野生动物学家们仍然高度依赖对狐狸粪便中可见物进行识别的方法来确认这种动物曾吃过什么。例如在加州圣华金河谷的偏僻区域，通过粪便中的残骸可以辨识出其食物中有啮齿类、鸟类和昆虫，然而在都市找到的沙狐粪便中，除了少量塑料包装物外，基本找不出可以识别的食物。加州人丢弃的深加工软质食品在沙狐的肠胃中通过，并没有留下太多痕迹，但碳同位素却记载了它们的食物从野生食物到超市食品的转变。如今，贝克斯菲尔德的沙狐比起它们的乡下亲戚来说，粪便中携带更多的碳13同位素（δ13C数值更高）。

当贝克斯菲尔德的沙狐搬到了城里，它们不仅扩大了日益缩小的濒危领地——它们也因为共享同样的全球本土化饮食，拥有与当地人类似的同位素比例。圣华金河谷的植物δ13C数值通常较低，小型的猎物也是如此，它们的碳原子便循环到了野生狐狸的体内。但贝克斯菲尔德的都市食物链与遥远的玉米产地挂钩，δ13C数值较高，这种区别如今也在都市狐狸浓密的尾毛和抽动的胡须中得以显现。

幸运的是，大多数对野生动物被人类“垃圾食物”喂养的担忧在这个案例中并不存在。相比它们的乡下亲戚来说，贝克斯菲尔德的狐狸繁殖力更强，平均存活率也更高，尽管它们面临机动车与鼠药的威胁。然而，人类与狐狸体内碳同位素平衡的另一种变化趋势就令人不悦了，并且这确实是全球性问题。

全世界的δ13C数值自从化石燃料开始被使用后都在持续下降。这种迹象随处可见，比如树木的年轮、湖底的层层沉积物或珊瑚形成的精致带状石灰石，当然还有你自己的身体。如果你能测试自己幼年时期头发中的碳13含量，你一定会发现比现在的数值要高——前提当然是你现在还有头发，饮食结构也没有发生巨变。

二氧化碳如果携带较重的碳13同位素，在进入植物及浮游生物的细胞时会更为困难，因此远古森林及海洋的沉积物，其碳13的浓度都比当时的大气中低。当我们燃烧这些化石沉积物时，就如同我们向今天的大气中倾泻了一场轻碳的洪水，最终这种对大气碳池的稀释又会通过供养我们的食物网络发挥它的作用。

与此同时，其他一些元素也随着煤炭的燃烧被释放出来。2012年，密歇根大学的研究者采用特定同位素比率测定法，将有毒的汞原子来源定位到了佛罗里达州水晶河边的火电站。一名研究员在接受密歇根大学新闻社的采访时说道：“本项研究首次采用汞同位素比率，调查因煤炭燃烧导致的近源汞沉积物。”第一作者劳拉·谢尔曼（Laura Sherman）说道：“这项研究让我们可以直接标记和定位那座火电站排放的汞，它们被排放到本地的湖泊中，并可能对其中的鱼类以及吃这些鱼的人们造成潜在威胁。”

有一点毋庸置疑：我们体内的碳原子证实，我们对全球碳循环的影

响甚于火山。通过测定夏威夷莫纳罗亚火山排放的二氧化碳δ13C数值发现，20世纪70年代时其平均值大约是-7.5‰，直到本书撰写期间已降至大约-8.3‰了——延续着工业革命以来的趋势。δ13C数值的每一次下降，都意味着大气中二氧化碳含量的上升。全球性的同位素变化趋势只是警告之一，它告诉我们在现代社会中，我们仍然通过原子链与地球紧密相连，跟我们的祖先并无差异。在这种不可避免的约束之下，能否让生活既美好又可持续，将是对我们的一大挑战。



人就是一个水盐体系的介质，里面只有可怜的一点水，大部分都是盐水。

——约翰·Z.杨

（John Z Young，英国神经生理学家）

任何事情的良药都是盐水：汗水、泪水或海水。

——凯伦·布里克森

（Karen Blixen，丹麦女作家，《走出非洲》作者）

汉斯·本齐格（Hans　Bänziger）是位昆虫学家，或者至少说是位昆虫爱好者。他也非常幸运，因为能够在东南亚的热带雨林里做他热爱的事情，并有所成就。然而本齐格博士不仅仅是幸运，他在同行中还小有名气，因为他曾在科研的使命以外，自己还充当过一回诱饵。

1992年，他发表了一篇意义重大的论文：《值得关注的新案例——泰国以泪为食的蛾子》。这个干巴巴的标题下，一般读者并不会意识到他接下来会读到什么。开篇第一句仅仅是陈述："已有10起食泪蛾在人类眼睛上驻留的案例被目击。"不过当汉斯·本齐格告诉你这种现象被看见时，他的意思是指在近得不能再近的距离观察——也就是在眼皮子底下，可真是名副其实的"目击"。

很多昆虫落到其他大型生物或东西上时，都是为了舔食盐水。最近在纽约布鲁克林发现的一种汗蜂，夏天经常会落在泛着油光的胳膊、大腿或面颊上，给居民造成困扰。色彩斑斓的蝴蝶像花瓣一样围在路边泥泞水坑的边缘，吸食盐分和其他物质。至于眼睛？尽管泪水也是盐水，但我们中大多数人都会觉得眼睛显然没有给昆虫留下驻足的空间。

但事实并非如此，当然这也要感谢这位敬业的昆虫学家。

自从1989年11月起进入这片森林后，本齐格就注意到在森林中的空地上，蛾子会在牛群附近盘旋。当时太阳刚刚下山，半轮弦月悬在空中。一只蛾子冲他飞来，落在了他的手腕上，开始用那细长的口器舔他的皮肤。过了几分钟，蛾子又来到他裸露的腿上，继续吸食着皮肤表面那薄薄的一层汗水。后来它干脆飞到本齐格的脸颊上，并移动到下眼皮的位置。"我此刻的感觉就像……一粒异常锐利的沙子正在我的眼球与眼皮之间摩擦。"

在这种情况下，大多数人都会一巴掌扇走这位不速之客。然而，本齐格却将他的相机镜头对准自己的脸，按下了快门，拍下了下面这张照片。



汉斯·本齐格在泰国遭遇一只以泪为食的蛾子。
令人称奇的是，照片由汉斯·本齐格本人拍摄

这种刺痛显然是因为蛾子的细爪正在抓挠着他的眼皮内侧——后来研究者认为，蛾子正是通过这样的方式刺激更多的泪水分泌。有些种类的蛾子，其丝状的口器边缘很粗糙并能引起足够的刺激，但这种蛾子的口器结构精致，仅仅会让人感觉似乎有什么东西在光滑的眼球曲面上扫来扫去。

“不过很不幸，”这句话看起来不太像是反语，“闪光灯还是吓跑了蛾子……”

之后过了将近一年，本齐格再次在晚间来到森林里工作。突然，他注意到一个黑影从他面前掠过，并且感觉嘴唇上有什么东西滑过，“仿佛是一根精巧的吸管”。这只蛾子随后探访了他的鼻孔，“简直是奇痒难忍”；紧接着蛾子又继续向上爬，轻轻地从他眼睛里吸食水分。

这种蛾子的到访很有绅士风度，本齐格用“异常温柔”形容了这种感觉，不过他也承认不该只是如此轻描淡写，并记录道：“全世界最大的饮泪生物之一，盘旋在我的面前，直接把4厘米长的口器戳在眼睛里，多

少有一点点难受。”他用一张扑虫网扣在头上，试图捕获这只蛾子时，这次邂逅却意外地终止了。

在某个偏僻山村附近的一处牧场，一天夜里月如银盘，他遭遇了更为难受的经历。一只蛾子越过几匹骡子和马，“突然改变方向朝我飞来”。这只蛾子尾随了他足有100米，并最终落在他的左眼开始畅饮。“我闭上眼睛使劲儿挤，但它就是没有离开的意思。”当晚的另一位不速之客则更具侵略性，“眼皮被挠得生疼。”他这般写道。两分钟之后，即便是本齐格也已到了极限：“当晚，在第二次纵容了这些以泪为生的家伙之后，我忍无可忍，抓获了一只施虐者。”

钠为何对动物有神奇的吸引力

把自己想象成昆虫眼中的移动泥塘当然让人不太痛快，但你的眼睛与泥塘确实在某些方面非常相像：两者都含有水分，并且都富含对生物有用的原子，而这些原子都源于地壳中的岩石。你的眼睛从很多方面来说都很像矿泉或吸引着野生动物前去舔舐的盐沼地，而你也和其他很多动物一样，都能尝到盐的味道。

人类有五种基本味觉——酸、甜、苦、辛、咸，而咸是唯一专门针对一种单一矿物质元素的味觉。甜、苦、辛三种味觉都是由相对复杂的有机物引起，酸味则来自含氢离子的酸性物质，只有咸味源于单一的元素——钠，一种来自岩石与土壤的元素。钠原子核中有11个质子和12个中子，在食盐中，它占到了原子数目的一半。钠元素让你的汗水和血液变得有味道，并协助你的所思所行，让你能够认知这个世界。如果你的体液中没有足够的钠，那么大多数细胞都会膨胀而死；反之，如果钠的含量太高，细胞则会干瘪，变成微型话梅干。它致使地球上98%的水都不能饮用，但这也因此让它有助于限定在这个被海水覆盖的星球上，哪些物种应该生活在哪些地方。

也许你早就听说过，相比我们的祖先，多数现代人都摄入了太多钠元素，但这个观点半对半错。一些历史学家指出，为了保存食物而大量用盐的习惯可以追溯到数千年以前。早在4000年前，矿盐开采在中国就已经非常普遍了，而罗马士兵的军饷曾经有段时间就是盐，这也是“薪水”一词的起源（薪水的英语为salary，盐的英语是salt，两者同源。——译注）。不管怎么说，为了满足我们对盐的需求，数以亿计的钱被花在了食品开发与贸易上；与此同时，医学专家却在警告，高钠食品与高血压、心脏病及其他并发症之间都有着很大关系。然而，因此就摄入太少的钠也不是正确的选择，对于你的健康而言，其中缘由既有趣而又重要。

技术上来讲，盐里面只有一半的原子是钠。正常情况下，像钠离子这样的阳离子总是要和一些阴离子如影随形，对于食盐和你的泪水来

说，阴离子主要是氯离子，也就是氯元素的离子形式，它作为家用漂白剂的活性成分为我们所熟知。尽管其他离子在你身体中也扮演着重要角色，但基于几个理由，钠离子还是可以堪称明星离子。首先，你可以尝出它的味道。如今，随着工艺的提升，食盐供应对于食品行业来说已是取之不尽；但在此之前，钠甚至比钾更难在食物中获得，后者也是一种对人体很重要的离子。蔬菜中含有大量的钾，因为植物通过它维持细胞中的水分平衡，并操控叶片中气孔的开闭。相对而言，钠在大多数植物中都不常见，因为植物不能像我们一般使用这种元素。比如苹果中钾的含量是钠的一百倍，而在杧果或油桃中，这种不平衡性还要加倍。

正是由于植物中缺乏钠元素，很多动物都需要从植物以外的地方寻找钠源，通常是借助对钠敏感的味觉细胞。无论你的盐分来自调味瓶还是半熟的牛排，这在全世界的食物链网络中都是相对比较少见的。对于多数食草动物而言，其食谱中并没有这样多钠的食物；既然植物王国不能供应足够的钠，它们就只好转向地质性来源了。

盐沼地之所以能够吸引野生动物，存在很多可能的缘由；但令人吃惊的是，关于这方面的确切研究却几乎没有。很多年以来，科学家们只是简单猜测，野生动物在泥泞中舔食，只是为了获取钠元素，并没有去分析泥土本身。但最新的研究显示，所谓的盐沼地其实含盐量出奇的低，野生动物或许偶尔也会另有所图。

比如南美鹦鹉，现代研究认为它们之所以吞食河岸边的黏土，其实只是为了解毒，因为它们食用的种子含有毒素。比起那些以昆虫为食的蝙蝠，尽管亚马孙果蝠的食物中钠含量更丰富，但它们造访黏土沉积物的频次却更高，其实也是为了提升消化功能。而近来对坦桑尼亚恩戈罗恩戈罗火山口的研究则表明，对于野生动物来说，盐是寻找其他稀有元素的关键线索，比如钴和硒，它们没有味道，却也是很重要的营养物质。

不少人也会有食土癖，主要也不是为了钠而是其他一些原因。评论家贝丝·安·芬内尔（Beth Ann Fennelly）曾经整理了一篇引人入胜的综述，这篇文章告诉我们吃黏土的人远比想象中多。尽管很少有人愿意承认以土为食，故而可靠的数据难以获得，但在南美洲的农村地区，研究

发现有一半的妇女会在怀孕期间食用黏土，而在非洲一些地区这一比例达到九成。多数案例都伴随着怀孕现象，但不少男性也会如此，可见这是营养与消化的双重需求。

在安第斯山脉地区，当地人经常会将土豆浸入黏土泥浆中，就跟蘸肉汤一样，而在秘鲁，泥土也会在市场上随着土豆一同销售。这样做的目的大概是防止土豆中的植物毒素给身体造成伤害，毕竟它和致命的颠茄属于同一家族的植物。黏土也可以成为抵御饥荒的食物，但很不幸它也会引起肠道阻塞，并带来寄生虫。其他一些研究则发现，一些人群食用泥土纯粹是因为喜欢。

芬内尔介绍了最近在旧金山一家画廊举办的泥土品尝大会，盛况堪比高端的品酒宴。泥土被盛放在酒杯中并用水泡开，释放出浓郁的芳香，供参会者品鉴。根据芬内尔提供的资料，白色奶油状的高岭土“就像混有花生味道的雨水，在嘴里像巧克力般融化”。密西西比州有一家人经常会“油炸高岭土并趁热享用”，而作者将她自己对佐治亚州高岭土的感受比作是在咬一块复活节巧克力兔。高岭土果胶（Kaopetate）有缓解腹泻的作用，它正是因其中含有的高岭土才得名，如果在此之前你也曾服用过它来助消化，那么，你其实也是食土一族。

然而严格来说，上述大多数案例并不能归类为食土行为。当你吃下黏土时，你并不会像吃下食盐那样，将它的原子用于构建或维持你自己的身体。黏土不能被消化，它们是由玻璃质矿物形成的鳞片，在你消化系统中扮演的角色就是短暂停留的海绵质。研究者在一些植物组织内发现，不受欢迎的分子倾向于吸附在黏土的鳞片表面，这会降低它们的危害，也更容易被排出。

另一方面，食盐中的原子很快就会成为你身体中的重要组成部分，而蝴蝶与蛾子的舔食习性很明确都是为了获取钠元素。事实上，这个过程的细节已经被准确揭示，因此我们现在可以大胆推测，汉斯·本齐格“捐”给泰国那些食泪蛾的钠离子将会遭遇什么。如果相关研究是可靠的，那么本齐格泪水中的钠离子便是送给蛾子“新娘”的新婚礼物。

尽管纽约州的蛾子对泪水似乎没有兴趣，但大多数还是会在晚上围到泥塘边共饮，就跟蝴蝶在白天所做的事一样，而康奈尔大学的科学家

斯科特·斯梅德利（Scott Smedley）与托马斯·艾斯纳（Thomas Eisner）在一项研究中证明，至少有一些蛾子利用这种方法获取了大量钠离子。斯梅德利与艾斯纳发现，大多数聚集到泥塘边的北方咕噜舟蛾（Gluphisia Septentrionis）——一种长相非常平庸的蛾子，通常呈灰色、棕色或奶白色——都是雄蛾，它们常会在当地的污泥“酒吧”里和其他雄蛾一起畅饮几个小时。一只咕噜舟蛾坐到“吧台”后，可以持续吸取相当于自身体重500倍的“矿物质水”，然后将过滤后的水从屁股喷射出去，距离能超过1英尺（30厘米）。

虽然这么说有些奇怪，但如果你也想要达成同样的“成就”，那么你就需要喷射出9000加仑（3.4万升）自己产生的废液，在你的身后划出优美的弧线，落到两百英尺（60米）以外，而此时你体内的钠含量也几乎翻倍。其实跟你一样，蛾子一般也用不着这么多钠——除非它们打算分享，而这正是咕噜舟蛾准备做的事。

在康奈尔大学的研究中，一对对雌蛾与雄蛾被放入条件受控的箱子中。在完成“约会”之后，雄性伴侣刚刚光顾过泥塘的那些雌蛾，体内的钠含量远远高于那些配偶不曾去过泥塘的雌蛾；与此对应的是，那些“泥塘客”在约会之后，体内的钠含量则降到原先的2/3。和生殖细胞一样，钠也是这些鳞翅目生物交配过程的一部分，是像一盒巧克力那样的求婚礼物。那么对于这么多钠元素，雌蛾又该怎么处理呢？

研究者们在分析了雌蛾所产的卵后，答案终于真相大白。收到钠盐大礼的雌蛾，产下的卵中也会含有更多的钠——这说明每一只被求过爱的雌蛾都会拿出婚礼所得的1/3到1/2，随着基因一起交给下一代。换句话说，泥塘里的钠原子，直接从父亲传给了母亲，接着又传给了孩子。与此形成鲜明对比的是，那些没有与“泥塘客”们交往的母亲，只好将自身80%的钠提供给了它们的卵，以确保合适的孵化条件。

那么这些跟你有什么关系呢？又如何揭示你和钠之间的关联呢？

首先，这一案例说明，作为动物王国中的一种商品，这种元素还是有点特殊性的——而你也属于这个王国。因为植物跟动物的生长方式不同，所以大多数植物性食品所含的钠都可怜至极。但是最终，我们拥有的钠原子却很富余，甚至可以引来昆虫舔食。我们体表的汗水及眼睛中

的分泌物，盐度接近海水的1/4。

你所有的钠原子都来自地壳中的矿物质。所以你逃避不了这样一个事实：你也是一个泥土食客，并且你也以其他食土生物为食。很久以前，我们的祖先基本是从食物中直接获取钠，但如今，我们多数人都是握着调味罐、勺子直接向食物里撒盐，或是由那些为我们生产并包装食品的人代劳。食盐是一种可以食用的矿砂，会在你的嘴里融化，刺激你舌尖的味蕾，进入你的血液，有时也会从你的眼角溢出——比如开心或难过的时候。

钠与氯，几亿年的爱恋

钠原子如何最终来到了你的泪水中？这个故事可以带着你的思绪，从火热的岩浆飞跃高耸的山峦，从幽深的矿井飞过闪着水晶般光芒的晒场，或是从动物、植物飞到你的餐桌上。不过顺着这个思路想下去，你身体中大多数钠离子都已经在海洋中游荡了数百万年之久。

直到美国南北战争之后不久，全美几乎所有的市售食盐都来自纽约州中部的一个地区，那里曾经是一片浅海。在5亿到4亿年前，在如今的雪城（Syracuse）附近，陆地的塌陷让一湾海水填了进来。数百万年过后，这片“地中海”早已干涸，在泥泞之间留下一片广阔的盐层，向西一直延伸到了今天的俄亥俄州。再次经历沧海桑田之后，一部分盐溶解到地下水中，又向上钻过数百英尺的沉积岩层以卤水的形式喷到地表。近几个世纪以来，奥内达加湖沿岸的原住民将这些沼泽泉流出的水收集起来，用煮或晒的工艺生产食盐。

到了19世纪，雪城地区的盐矿和盐泉被大规模开发利用，当地也因此获得“盐城”的称号，而全美国最古老的蒸气加工厂就在附近的银泉市，为莫顿盐业公司（Morton Salt Company）所拥有，目前仍然在运行之中。莫顿食盐因为在下雨天仍能倾倒而闻名（这还需要归功于一种保持盐粒不粘连的惰性粉末），如果你家餐桌上也摆着这一品牌的食盐，那么这些微小的立方晶体，很可能就来自银泉市地下的古生代海洋沉积物。不过，最初它们在那个古老的海洋做什么呢？

当海水蒸发成岩盐时，钠就会和氯结合，但是在海洋中相会之前，这两种元素却有着很多形形色色的来源。你体内的大多数氯原子都来自火山灰以及超高温的熔岩，而你的钠最初则是从凝固的岩浆或熔岩风化而来。

当雨水和地下水冲蚀岩石的时候，它们会从中萃取出钠离子并带着它们一路倾泻，最终抵达海洋，或是汇聚到封闭盆地中，比如以色列的死海和犹他州的大盐湖。它们很乐意踏上征途，主要也是因为水分子觉

得它们很有吸引力。如果你能缩小体型，小到足以观察某颗玄武岩的原子，当它在暴雨的洗礼下轻微碎裂时，你就会看到，一队钠原子新军轰轰烈烈地开始了旅行——你的泪水、汗水和血液中的那些钠原子也曾经历过同样的旅程。好了，既然你成了微缩版的你，那么何不干脆穿越到4亿年前，看看一座如今坐落于纽约州北部的山坡上的风化面？看完之后，你就可以精确地知道，你的很多钠是从何而来了。

水分子撕扯着矿物表面，长石颗粒的构架不断被削弱，其中的每一颗钠原子都在这样的桎梏中振动不已，仿佛迫切想加入水分子大军。水分子具有弱极性，一对氢原子位于同侧，带有微弱正电荷，处于中间的氧原子则带有微弱负电荷。由于溶液中的钠离子携带正电荷，根据异性电荷相吸的原理，水分子中显负性的一端就会将它们从矿物晶格中“诱骗”出来。如同遇到解放军的农奴一样，你的钠原子在被关押了几百万年后终于重获自由了！

每个钠离子都被六个水分子用负电荷端紧紧抵住。在这“第一层水合膜”之外，还有第二层水分子团，这使得阳离子的有效尺寸可以膨胀到原始体积的好几倍。钠离子与水分子构成的分子团簇翻滚到流水中，在身边是其他刚从同一块岩石表面上被释放出来的“翻身农奴”。

它们汇进一条小溪，一路向西注入温暖的浅海中，每个钠离子依旧保持在一大群水分子的中心位置，在远古的鲨鱼和三叶虫之间游荡，而这些生物的化石还依旧被埋在岩石之中。然而，阳离子身边的这些水分子护卫并不是很靠得住，任何一个水分子都可能会跳开，留出空缺让另一个水分子顶替。但如果顶替的水分子不再充足，钠离子就会发现它被遗弃了。缓慢的地壳运动将古生代的纽约州从大洋中隔离之后，陆地中央的海水逐渐干涸，也就发生了上述过程。

盐水的浓度不断上升，随着陪护分子的蒸发，其他溶解于水中的物质也同样遭遇了遗弃。在这其中，数量最多的莫过于氯离子了，对于日益孤立的钠离子来说，它们的吸引力也与日俱增。与钠离子一样，氯离子在溶液中也跟明星一样，身边围绕了很多水分子“粉丝”，只不过这次水分子调了方向，将正电性的一端指向了它们。我们可以想象，相比钠而言，氯如此受欢迎令人更为吃惊，因为在矿物颗粒中，氯原子比钠更

不合群，很难与其他原子紧密结合。

大多数矿物中，氯离子都很难被锁定在晶格中，这与钠离子不同。尽管你也能在火成岩矿石——比如玄武岩或花岗岩——中找到它的一丝踪迹，但它通常会存在于被岩石困住的液泡或是矿物颗粒之间。正是这个原因，对于碧玺这类看似不透水的宝石，地质学家会采用将其水煮再将煮过的液体蒸发的办法来测量它的氯含量。

氯原子通常会以氯化氢的形式从熔岩中逃逸（氯化氢是与你胃里面的胃酸相同的一种物质），它们多数会随着一缕缕火山灰飘浮在空中，而地质学家估算，每年火山都会向大气中释放数百万吨氯化氢。随后它们会溶解到雨滴中，并最终汇入大海。

根据美国地质调查局研究员赫伯特·斯文森（Herbert Swenson）的报告，每立方英尺（28升）的海水中含有2.2磅（1千克）盐，比一般湖水中的含盐量要高200倍以上，其中85%的可溶物都是钠离子与氯离子，剩余成分则主要是镁离子与硫酸根离子。尽管每年河流都会向海洋中注入40亿吨这样的溶液，但全球海洋的平均盐度依旧保持稳定，因为几乎等量的盐会被海床沉积物所掩埋。

目前，全球海洋中的含盐量大约有5亿亿吨，如果将它们全部提取出来，足以在所有陆地表面下一场500英尺（150米）厚的“盐雪”。类似的事情其实也曾小规模地真实发生过，地点就是4亿年前的纽约州中部。

海面逐渐萎缩，在越来越浓的矿物质卤水中，钠离子和氯离子也在慢慢靠近。当最后一滴水也被蒸发之后，氯化钠晶体便堆砌成一层层岩盐，足有几十英尺厚。很多年过去后，盐床被上千英尺厚的页岩、石灰石还有其他一些沉积岩所覆盖。这些经历过海枯石烂的难民，如今又逃到莫顿盐业公司的蒸发室中，最终被摆上了你的餐桌。

所以当你下次摇着盐瓶往食物中撒盐时，可以想想你要拆散的是一份海枯石烂的感情。在经历了多年的分离之后，电荷相反的两种离子在濒死的海洋中牵起了手；而在你的体内，它们又会重新变回溶液状态，推来搡去的水分子会将它们再次分开，并不会为这些古老的情侣离子流

下一滴眼泪。它们即将书写一生中最华丽的篇章，在一片生机盎然的原子海洋之中——也就是你的身体之中。

如果你体内的钠消失了……

你在吞下钠和氯的时候将会发生什么？当然，可别去吃单质状态的它们——纯钠在接触水时会发生爆炸，而氯气则会破坏你的肺——正如“一战”期间它在战场上对士兵们的所作所为那样。你需要离子状态的它们，当你将它们中和成温顺的食盐后，吃下它们就变得很简单了，因为你唾液中的水分会迅速将晶体拆散成带电荷的离子。

钠离子在你嘴中溶解后，所做的第一件事就是向你汇报它已经抵达。在你舌头上分布着数以千计的味蕾，上面的微孔将一些阳离子迎了进来，触发了你的神经脉冲，而你的大脑便将此信号翻译成“盐的味道”。尽管到目前为止，味觉的学问还是有一些神秘，但已经很清楚的是，这些钠通道不仅是通向美味的大门，也是通往味觉行为本身的入口。稍后你还会看到详细介绍。

和你在学校所学不同的是，味觉并不是严格分布在舌头上一些不连续的位置。实际上，我们多数人的整个舌头都能感受到咸味，包括口腔壁也能感知；尽管特定的细胞会对某种味道尤其敏感，但其中很多都可以对不止一种刺激有响应。最新研究表明，基于多种原因，这一结论对于钠离子而言尤其正确。

你不能像在骨骼中储存钙那样把钠也储存起来，所以你的身体只能对溶解状态的钠离子进行仔细监控和调节。肾脏、结肠与汗腺负责管理大部分盐分的排出，而当你吃或喝的时候，口腔中的味觉细胞则会帮助大脑控制该让多少钠进入你的身体。如果食物偏淡，那么你味蕾中的“食盐专家”就会鼓励你多吃一些，享受这个过程；但是如果食物很咸，多吃一点就足以构成风险，那么它们也会触发那些通常会对苦味物质有强烈反应的味觉细胞。

咸味与苦味的感应细胞之间相互影响，这也可以用于解释低钠盐中诸如氯化钾的一些成分为什么会有偏苦的后味，而这可以起到降低其用量的作用。唯一一种能够触发食盐感受器且引起的愉悦感可以和钠媲美

的原子是锂，但不巧的是，你不能通过给薯片撒上氯化锂的方式来促进健康，如果处理不当，这种原子可是会让你中毒的。

口腔中存在这些味觉传感器暗示了这些钠对你身体的重要性。不过，究竟你要它们做什么用呢？要回答这个问题，不妨这么想：如果人体中的钠消失了，会发生什么呢？

罗伯特·麦克坎斯（Robert McCance）是伦敦国王学院医院的一名医师，20世纪30年代，当他注意到在《伦敦皇家学会论文集》上尚未发表过关于人体缺盐的“任何有价值的论文”时，就组织了一场名为“直接攻击实验”的项目，要求志愿者无盐饮食，并迫使他们每天都大量地出汗。

测试人员搭建了一些安装有加热灯的临时圆筒，里面摆着床垫，受试对象便躺在上面出汗，实验助手则将汗滴用纱布收集起来并测量盐分流失。在经历了4个半小时的煎熬后，一名受试对象的脱水量已经超过半加仑（1.9升）。他在日记中记录道：“结束后几分钟，整个人都还是崩溃的，感觉彻底虚脱了。后来总算缓了过来。体重一共减轻了……2150克。”

志愿者们自己在家做饭时，也只能吃些面包、人造奶、煮过三遍的蔬菜或是其他一些无钠食品。所有分泌物，无论液态还是固态，都会被收集干燥并称重，以供测试。

由于体液中钠的含量陡然下降，受试者几天内就开始出现一些症状了。麦克坎斯记录道：“身体缺钠导致所有三名受试对象都出现了体重下降、脸颊凹陷的现象，看上去像是生病了。”所有味觉都发生了退化，这也就能解释，为什么人们很难去适应低钠饮食。烟卷变得索然无味，煎洋葱也只能有些“非常恶心的油腻甜味”。喘不上气也是个问题，精力明显下降，其中一名男性甚至胳膊“举不起剃须刀”，下颚“咬不动烤面包”。

10天后，他们汗水中的钠浓度已经不足第一天的1/3了，尿液中几乎没了钠的身影。他们的血样颜色变深，也变得更稠，但血压、尿量和心率仍然保持正常，因为受试对象的饮水并不受限制。这个过程并非是在脱水，而是在缓慢“脱盐”。

很幸运的是，实验结束后志愿者们很快就恢复了健康，也没有留下后遗症。在食用了含盐面包、黄油和鸡蛋以后，仅仅几分钟后他们就找回了味觉；两天过后，他们的精力也恢复到了之前水平。其中一名男子在恢复正常后难以抑制激动的心情，以致“从行驶中的大巴上跳下，飞奔上了楼梯”。

相比于钠的缺乏，脱水的问题显然更为严重，因为不管怎么说，我们身体中大部分物质都是水，而且水也是体内很多化学反应的介质。吃、喝与排泄废物都是我们保证身体平衡的活动，而只有将供应和需求调节在正常水平上，你才能保持适当的生理机能。

一个典型的相对久坐的美国成年人，每天都会通过几百万微腺体，像挤牙膏一样将30盎司（0.85千克）汗液挤到皮肤表面。你前额的每平方英寸皮肤都有几百个汗腺，不过其他部位则有多有少。比如，你的手臂皮肤上每平方英寸分布着将近1000个汗腺，而在你的手心上，汗腺密度相当于这个数字的两到三倍。甚至，你汗水中的成分也会随着部位与环境发生变化，那些让腿保持凉爽的汗水，通常就比手臂上的汗水盐度更低，而在你的腋窝，富含油脂与蛋白质的“情欲汗水”会在微生物的作用下，产生特殊的“香味”，可以起到社交暗示的作用。

算上肺部呼出的蒸气以及肾脏与结肠分泌的大量排泄物，一名成年人在没有剧烈运动时每天会损失5到6品脱（2.5到3升）水，因此每天都需要进行补充，使身体中的水量维持在11加仑（41升）。如果在这个平衡关系中再考虑剧烈运动和高温天气，那么一天消耗2到3加仑（7.5到11升）水也很容易，这些水中会含有大约1盎司（28克）盐。这种持续的体液损耗会让你的身体更易因脱水而受损，而且比饥饿的影响更大。如果你的正常饮水总是不能被满足，一旦出现结构性影响，你的身体就会开始慢慢衰竭。

1906年，地质学家兼人类学家W.J.麦吉（W.J.McGee）在一次医学会议上做了一场题为《沙漠口渴也是病》的报告。就在此前一年夏天，一名男子没有带够足量的水，在亚利桑那沙漠中流浪了超过一周，幸亏麦吉救了他一命。他的痛苦经历成为医学文献中的经典案例，而且这也说明了，盐水平衡不但对你的内在健康，甚至对你的物理外形都起着多

么重要的作用。

当时，这位名叫巴勃罗·瓦伦西亚（Pablo　Valencia）的墨西哥裔勘探员与一名同伴骑着马离开了麦吉的营地，向着遥远的金矿进发。当天晚上，同伴牵着两匹马回到了营地，说瓦伦西亚准备徒步前往，身上只有一小壶水。经过一场近乎绝望的搜寻之后，最终发现近乎一具残骸的巴勃罗蜷缩在一棵铁木树下的沙子上奄奄一息。

根据麦吉所述，一半旅行者在穿越亚利桑那沙漠一天半以后，就会因为口渴而缴械投降，但瓦伦西亚居然在八天八夜里连走带爬地挺过了100多英里。他仅有的淡水来源，除了那一壶水，不过是偶然碰到的昆虫或蝎子，以及自己少得可怜的尿液。

在身体恢复期间，瓦伦西亚描述了他逐步舍弃衣物、工具以及金块的过程，而且有几次还看到秃鹫在向他靠近，近到他伸手可及。他已经严重脱水，以至于那些被荆棘和石头深深刮破的伤痕都不能流出血了。他的鼻子缩到原先长度的一半，嘴唇几近消失，舌头“就是一条黑色的干皮”，甚至他眼睛周围的组织也严重萎缩，眼球的白色部分都已暴露在外。

很多资料都描述过，在我们身体失去1%到2%的水分时，细胞中的钠感受器就会发出信号，让我们开始感到极度口渴。脱水达到10%至15%后，通常就会出现痉挛、精神错乱，再严重的脱水就会致命了。然而令人吃惊的是，从皮肤和口腔蒸发的水汽，让巴勃罗·瓦伦西亚失去了1/4体重，尽管如此，他还是坚持靠着两条腿往回走，直到一周后获救，幸运地捡回了一条命。

这两个案例——麦克坎斯的志愿者与麦吉的矿工——可以从一些角度说明，盐分与水分的短缺对你会有什么影响，然而引起这些效应的过程却相当简单：一切皆归结于原子的随机热运动。

例如，钠元素缺乏的受试对象感到犯困，是由细胞中盐与水的相对运动引起的。水和水中的溶质会从自身的高浓度区域向低浓度区域发生净迁移，这样的迁移过程分别被称为渗透和扩散。这两种过程的动力都是原子的热运动，而你的健康也依赖于这两者之间非常不确定的关系。

结构精致的细胞膜让水分子比盐的离子更容易通过——水分子通过氢键聚集在这些离子周围，使其变得臃肿。因此，钠离子主要依靠蛋白通道与离子泵（一类特殊的载体蛋白）才能穿过细胞膜。在运动不息的原子王国，在细胞与外界环境之间，简单地挡上一层选择性渗透膜就足以产生显著的效果。

如果你将一个红血球细胞放到一滴纯水中，然后在显微镜下进行观察，很快你就会看到它在膨胀，然后像一只充气过头的气球一样炸开。这是因为水分子可以很容易借助“原子之舞”穿过薄薄的细胞膜进入细胞中，但盐的离子却被困在细胞内。水在不断进入，盐分又不能渗出，这样的不平衡就导致了细胞的膨胀。不过，在浓度非常高的盐水中，情况则会相反，红血球会发生萎缩：水分子向外的渗透作用与自外而内的扩散作用不相称，因为钠离子不能穿过这层细胞膜屏障。

细胞中水与盐这种不同步的运动方式可以产生显著的效应。例如，钠离子缺乏会引起红血球膨胀，使之不再能够轻易通过狭窄的毛细血管，由此引起的堵塞会迅速导致全身缺氧，麦克坎斯的那些病人出现嗜睡症状就是这个原因。麦吉所描述的那些令人不适的脱水效应，也可能是由渗透压不平衡所导致的细胞尺寸变化引起的，当然你大可不必去沙漠里亲自走上几天来体验。不过，你也可以通过喝入大量的水，体验细胞尺寸的反方向变化。

20世纪70年代，我的一些大学同学和我曾经搞了一场喝水比赛——现在回想起来当时真的是太傻了，因为我们完全没想过这有多危险。我们的规则很简单：一分钟一杯，“一口闷”。不到一个小时，我们就都不玩了，痛苦不堪，浑身颤抖，一个个都跟喝醉了似的冲到卫生间呕吐。我们以为颤抖和蹒跚都是因为冷，但这也算说对了一半。不过，这也许就是一些更大悲剧的开端，因为我们当时并不知道，一些更为好胜的参赛者已经为此付出了生命代价。

因为喝水过多引发抽搐并致死的悲剧时有发生，通常都是在同样类型的比赛中。2007年，一位已有三个孩子的年轻母亲在喝下太多水之后突然丧命，她当时正在参加广播电台里一项名为“憋住尿，Wii拿到”的比赛（Wii，任天堂推出的游戏机）；而喜欢追求刺激的大学生也常常是

这个节目的受害者。脑细胞的膨胀会将血液压到颅腔中，同时如果你的神经细胞过度膨胀就会开始失去功能，这也是为什么运动员在长时间剧烈出汗之后，通常都不是大口去喝纯净水，而是去喝佳得乐或是其他富含电解质的饮料，以便更好地维持他们的渗透压平衡。

你的眼泪则会通过类似过程让你远离感染。泪水中有一种溶菌酶，可以破坏细菌坚硬的细胞壁。当空气中的细菌落到你湿润的眼窝中时，它们的细胞壁会在溶菌酶的作用下变得不堪一击，不能够抵抗渗透压膨胀，随着它们在这里胀开并瓦解，诱人的绿洲瞬间变成了死亡陷阱。盘尼西林和其他抗生素也会先削弱细菌的细胞壁，然后征用你的体液作为防御型渗透压武器。

不过，钠离子穿过细胞膜的扩散过程可不仅仅是改变细胞的形状，还有很多更复杂的影响。它还让你可以思考、可以感知，还可以完成数不清的动作。

神经靠钠离子波传递信号

在你的神经系统中，数以千亿计的丝状细胞产生电场，但它们不能像电线那样传输信号。给铜线降降温，铜线的导电性依旧很好；可要是给神经细胞或者神经元降温，降得太多，它们就不能正常工作了，低体温症受害者可以证明这一点。在你的神经细胞网络中，并不是靠电子快速传递形成电流，而是一种扰流，很像是海洋表面的波浪，而驱动这些波浪的，主要就是钠离子的热运动。

现在请你不妨动动脚指头。此刻，钠离子正在帮助你完成这个动作，而且它还告诉你做这个动作的感受是怎样的。你的感觉、你的思想，还有诸如此类的自发动作，都是神经脉冲的表现。而所有这些脉冲，都和离子穿过神经元薄膜的扩散过程有关。

要想象这个过程是如何进行的，可以回想一下体育馆里成千上万个观众是怎么玩“人浪”的。当一个人举起或放下手臂时，接下来的一个人会很快重复同样的动作，并如此这般传递下去，形成一股股波浪在人群中起伏。没有人离开座位，传播的只是波动，如果协调得好，可以比任何一个人跑得都快。

神经脉冲和“人浪”非常相像，不过传递波浪的不是手臂的上下摆动，而是大量微型通道的开启闭合。一个神经元可以携带数百万个这样的通道，可以迅速打开透过细胞膜的通道，只允许钠离子通过。每一条通道都是被蛋白质包围的小孔，钠离子周围的水分子层则会被这些蛋白质撕开，并开启一条定制通道，宽度恰好可供钠离子挤过。

通道打开后不到一秒钟就会被再次关闭，数千个钠离子趁机扩散进入神经元，而此前神经元内部的钠离子浓度不过是外部的1/10。这一过程引起周围的通道纷纷效仿，直到扩散的钠离子流抵达神经细胞的末梢。在那里，信号传递给其他神经元或肌肉细胞，它们可以继续传递信息或是对信息做出反应。

比如你刚刚动过脚指头——首先你是先答应了我的请求，这个决定经过你的大脑以接近每秒100英尺（30米）的速度传递出去，这引发了一连串钠离子的扩散运动，顺着你的脊髓高速向下冲去——这样的脉冲可超过每小时200英里（322千米）的速度。接着又是一瞬间的工夫，信号就穿过腿部来到脚趾。当相应的肌肉拉动了你的脚趾后，感觉神经元就会向大脑发射“钠离子波”，汇报“任务已完成”。

这一切看上去如此机械，在自然界中如此基础，以致让我们很难相信，正是这看不见的“原子波”，通过那些将你的眼睛与大脑连接的神经元，让我写下的这些文字得以被你读到。但它们做到了。数字信号的闪烁可以让计算机产生可视图像，让你可以遐想身临其境的感觉；盐瓶中的原子也一样，通过一系列扩散作用，让你能够看、听、尝、嗅、触摸以及思考你身边这个鲜活的现实世界。

上述神经活动的这个简化版本说明，钠离子对于你的神经系统究竟有多重要，尽管故事中还有很多细节我们没必要在此展开，只是简单叙述一下。氯离子通道有助于调节神经元中的电荷平衡，而位于神经下游末端的钙离子通道则有助于向邻近的细胞传递信号。在钠离子波从神经元中经由像水闸一样的选择性通道扩散出来之前，钾离子就已经守在那里了；神经系统接着会被复位，在新的信号发生以前，微型的离子泵将钠离子推出去，并将钾离子抽进细胞。钾离子也是内耳神经的主波离子，所以当你下次吃富含钾的香蕉时，你就可以想象，那是来自热带的原子从听觉细胞流入你脑海时发出的窃窃私语。

这些过程不会持续很久——有些神经元可以在1秒钟内重复装填并传输超过500次信号。但这也不是没有代价，因为虽说渗透与扩散都是自发进行的，细胞膜上的分子泵还是需要消耗能量的。根据估算，在休息时，身体中有1/5的能量都是为神经系统提供的，其消耗的氧气也占到呼吸总量的1/5。

很幸运的是，实现这些功能，你并不需要去多想什么，你的原子就帮你打理了这一切——无论白天黑夜。对于地球上其他动物来说，这也是幸运的，因为无论是在舔盐的鹿还是饮泪的蛾，都跟我们一样利用钠离子波传递神经信号。

有些动物甚至会利用这种对钠离子扩散的需求，将其作为防御方式。一些水生蝾螈会携带一种防御性的神经毒素，也就是河豚毒素，跟河豚体内的致命毒素一样，后者对于寻找刺激的食客来说简直是臭名昭著，如果处理不当，它很可能会要了食客的命。河豚毒素可以封堵住神经元的钠通道，极小的量即可引发痉挛，比氰化物毒性还要高好多倍。这种毒素只需要让临界数量的钠通道失去机能就够了，所以几毫克就如同是在头上砸进了一颗钉子，几个小时内便可杀死一名成年人。

有些杀虫剂则正好相反，通过过度刺激钠通道破坏昆虫的神经系统，例如苄氯菊酯。苄氯菊酯会和昆虫的钠通道结合，并使其保持打开的状态，神经元无法顺利复位，昆虫因此而翻滚、瘫痪或死亡。你自己的神经元与这些昆虫有着明显区别，因此苄氯菊酯并不会形成妨害，但如果你确实很不喜欢待在有神经毒素的环境中，那么在食用沙拉的时候也要避免食用菊花，尽管很少有人会因为食用它们感到明显不适——它们可被应用于另一种类似的神经杀虫剂中，也就是所谓的除虫菊酯。

其他一些植物也会产生防御性神经物质，比如烟草中的尼古丁，还有胡椒中的特殊气味物质，皆是如此。相对温和的墨西哥胡椒形成的明显灼热感是一种味错觉，那是因为辣椒素会在口腔中骗过你的钠通道，让它们发出灼热和疼痛的信号。如果咬的是火辣的哈瓦那辣椒，那么你口腔中那些受骗的神经元就会一起咆哮，迅速打开钠通道，就像你刚刚吞了一块火红的炭似的。这种热的错觉也会愚弄你的汗腺，让你汗流浃背。

下一次当你沉溺于麻辣烫带来的快感时，不妨换个角度想想闪闪发亮的汗水和不由自主产生的泪水。它们并非只是你自己的汗水和泪水，也是地球自身的组成部分。

你的汗水和泪水之所以是咸的，是因为它们来自咸味的淋巴液，它们从血管中渗透而来，像是富含矿物质的地下水。你眼睑下面的泪腺会持续分泌泪水，眼中其他一些腺体则会分泌出油膜覆盖你的眼球表面阻止水分挥发，还会分泌出作为基底液的黏液，以及用于抗菌的溶解酶。这些物质滋润并保护着你的角膜，随着你不断眨眼而平滑地扩散，然后又经过眼睛内角膜上的微孔渗透到身体深处。

泪水中的渗透平衡，与血液和淋巴间的平衡作用类似；但你的泪腺分泌的泪水中含钠量略低，这可能是为了减少其流失到环境中的量。通过开启或闭合各种膜通道并选择性地在各处抽吸盐离子，这些腺体促使水遵循着渗透作用，流经一条干涸得有如盐泉的运河，汇入到你眼睛下半部分的“泪湖”中。尽管每一汪由盐泉汇聚而成的湖泊都只有大约30微升，体积尚不抵正常的一滴雨水，但一次刺激、一个深深的哈欠，或是由欢乐、痛苦、悲伤引发的神经信号，都可以让它溢流出来成为泪水。

想象一下你泪水中钠离子的旅程——它们在你的脸颊顺流而下，或许会刺激你舌头上的盐感受器，或是触动好友富有同情心的泪腺。它们在石头中被困了太久——它们或许曾经在珊瑚丛中漂泊过，或是溅到过原始热带海滩的沙滩上，也可能曾流经过世界上第一条鱼的鳃；与它们结合在一起的，曾经在火山口嗞嗞作响的氯，也在同一片原始海洋中徜徉，并邂逅了它们的伴侣，直到最终随着美味一起进到了你的口中。

假如你身在泰国，正在晚风沉醉的室外用餐，如果你还想让这些跨越了时空的原子和你多待一会儿的话，那么也请你千万提防那些飞蛾别靠近你的眼睛。

6 生存，毁灭，和来自空气的面包——氮



让饥荒变为富足，这是科学的力量……氮的固定是最伟大的发现之一，它一直在等待着天才的化学家去发现它。

——威廉·克鲁克斯爵士

（Sir William Crookes，英国化学家，铊元素的发现者）

原子里面没有恶魔，有的只是人类的灵魂。

——阿德莱·史蒂文森

（Adlai Stevenson，美国政治家）

原子可以制造出炸弹和毒药，很多人也因此而惧怕原子。但事实上，最伟大的生命也是由原子构成的，包括你和我。蜜蜂可以产出美味蜂蜜，但它们也能够蜇人；一个人既可以是撒旦也可以是圣人，而实际上我们每个人都会融合这种两面的性格。而这样的多面性，在德国化学家弗里茨·哈伯（Fritz Haber）的一生中展露无遗。

哈伯开发了以空气中的氮为原料制造化肥与炸药的工艺，作为发明人，他需要为数百万人的死亡负责，其中可能还包括他妻子与儿子的自杀；但同时他也为20世纪几十亿人能吃饱肚子做出了很大贡献。他的发明及其工业应用也让他在1918年荣获了诺贝尔化学奖，具有讽刺意味的是，该奖正是由阿尔弗雷德·诺贝尔通过生产含氮炸药积累的巨大财富创办的。

弗里茨·哈伯的传奇一直与氮有关，一个和他一样具有多面性的生命元素。你呼吸的每一口气，听到的每一个声响，念出的每一个单词，其中的氮元素占比都超过3/4。有时，它会让湖水酸化，或者把建筑物化成碎石。在漫漫历史长河中，它将人类、动物还有植物与土壤寄居菌、闪电以及天空标志性的蓝色联系了起来。不过，或许最令人震惊的是，它现在将你身体中很大一部分原子构架和弗里茨·哈伯联系在了一起。

天空为什么是蓝的

不妨找一个明媚的晴天抬头看一看天空——之前你肯定已经这样做过无数遍了。

但是，现在请认真地盯着天空。

这是多神奇的一件事啊——乍一看，你也许会把天空当成是实实在在的天花板，就跟古人的思想一样。当古人说到“天穹”时，他们真的是把天当成了一个屋顶。当然，在这蓝色深空背后，并不存在什么确实的顶棚。你所看到的是一片明亮的薄雾，一层透光的阴霾，包围着地球向阳的那一面，看起来就像一片朦胧的隐形眼镜。阳光可以透过这层镜片，流星也可以刺透它而不会留下破洞。在头顶上方不远的地方，我们还可以时常清晰地看到鸟儿、白云、飞机在这层透明的介质里穿过。那么，天空的蓝色是从哪儿来的呢？

这个问题恐怕在语言刚刚形成的时候就出现了，但现代科学能够明确地回答这个问题还有赖于近代很多研究者的工作，其中就包括另一位诺贝尔奖得主——阿尔伯特·爱因斯坦。爱因斯坦是著名的和平爱好者，也是世人皆知的原子弹之父，一生科学发现无数，但都没有他的相对论流传得那么广。1910年，他的朋友哈伯正在尝试将氮作为生产氨气的原料，与此同时爱因斯坦也发表了一篇论文，揭示了氮气在让天空产生颜色的过程中所发挥的作用。

在理解这一作用之前，我们首先要回忆一个重要的事实，那就是一般空气的气态物质中，氮气的比例达到了78%。与组成剩余绝大部分大气的氧气相同，氮气分子也是由两个同样的原子——也就是氮原子——构成，但是氮气分子中的这对孪生原子却与大气中其他成分有着诸多不同，无论是看上去还是实际表现。

当你呼吸的时候，双原子的氮气会随着氧气一道扩散到你的身体中。如果你是一名初级潜水员，你一定知道，在水下呼吸高压空气时，

会让更多氮气溶解到血管中，如果没有经过减压就迅速浮到水面，它们就会形成气泡从血液中逸出。这些气泡可能会导致严重的关节疼痛，阻断血液循环，或是损伤神经系统，这些可能致命的病症就是广为熟知的“减压病”。不过多数时候，你的细胞都会无视这些氮气分子，把它们看成是无关紧要的临时过客。虽然你需要氮原子用于构建并维持你的身体，但你却不能像吸入氧气那样，简单地靠吸入氮气来满足供应。你只能通过吃来补充，为了让它变得可以食用，你就只能依赖其他生物了。

这个问题的原因在于，对你而言，氮气转化为生物性氮需要更为有效的转化过程，就如同花蜜转化为蜂蜜一样。即便你的肺里充满了氮气，也仍然有可能因食物中缺乏氮元素而死。可见，将氮气转化为可用之物还需要强有力的工具，而这种工具只为少数物种拥有。这些幸运儿握着这把可以挖掘无尽宝藏的钥匙，而地球上包括人类在内的其他生物都需要依赖这些原子宝藏生存。

导致这一元素如此难以获取的原因，也正是天空呈现蓝色的原因之一。氮元素似乎更喜欢和同类组合在一起，至少在它最常见的形态中是这样的。大气中的其他分子也会通过共享一个或多个电子形成共价键的方式两两结合，但不会像氮气这么牢固。氢气分子是依靠单键组合，氧气分子则是双键，但氮气中的两个原子却是采用超强的三键结合在一起，因此一旦它们形成以后，就很难再被分开。如果两个好友可以被称为“穿同一条裤子”，那么氮气中的两个氮原子就如同热恋的情侣一般，从头到脚都扣在一起。

原子通过周围的电子云结合成分子，氮气也不例外；但电子云并非是完全固定不变的，如果给予这样的分子剧烈的震动，那么围绕在原子周围的电子云也会轻微扭曲，明媚的早晨，当太阳升起时，这一效应会十分显著。就像草原上的蜜蜂开始一天劳作前那样，空气分子醒来之后也会产生“蜂鸣”，只不过这种蜂鸣不是声波，而是光波。

我们头顶这个多氮的天空呈现的颜色可不仅仅是一幅背景——它还从生理上影响着你。有关光照对人类生理影响的最新研究发现，当人类视网膜暴露在蓝光之下时，会抑制褪黑素的产生过程，而褪黑素是一种诱导睡眠的激素。在古代，你的祖先可能就是因为对这种透过“天空滤

镜”照过来的阳光有反应，才会在白天下意识地保持警惕，这也就是睡眠研究人员所称的“不可见的视力”。然而，如今一些专家也认为，电脑屏幕、电视和其他类似钟表底光的人工照明发出的蓝光却可能造成很多疾病，例如抑郁、失眠以及其他与疲劳相关的病症。

要解释光照下的天空为何是蓝色，我们不妨将空气中的分子想象成一群看不见的微型蜜蜂——当然是不会蜇人的那种。在它们之中，你可以同时看到三种方式的运动正在进行着：整个蜂群在风的吹动下会整体移动，而单个“蜜蜂”则会因为混乱的热运动飘忽不定，但天空颜色主要来自于第三种运动——空气分子内部的运动，就好比蜂鸣也是蜜蜂自己身体发出来的一样。

蜂鸣声是由蜜蜂的肌肉快速振动而产生，翅膀拍击、打落花粉或是在寒冷的早晨使身体变暖，能量都来自这种振动。如果你的手心落了一只健康的蜜蜂，也会因这种振动而感到发痒。分子发射光线就如同蜜蜂发射声波，只不过利用的是电子而非肌肉。当阳光照到氮气分子时，作为反应，分子的电子云也会有节奏地跟着扭动，因此，研究这一无声“蜂鸣”的物理学家有时也会用音乐术语“谐振子”来指代分子。最近刚好有一位专家跟我描述了这一现象，还严厉警告说千万别把这一段解释砸了。

“很多人都搞错了，”克雷格·博伦（Craig Bohren）跟我说道，“甚至不少科学家也是。只有你不再错误地声称天空只是蓝色或者主要是蓝色，你才是对的。”

这位德高望重的大气科学家已经从宾夕法尼亚州立大学退休。在给了我一个令人吃惊的警告之后，他开始带着我领略天空呈色的基本原理。

“大气主要由氮气与氧气分子构成，它们的直径比可见光波长要小得多，因此当阳光照射过来后，它们便会将阳光散射到四面八方。实际上，它们会散射所有颜色的光，只不过波长较短的光会更为明显。”所谓波长较短的光，也就是蓝光，但也包括紫光。所以现在问题来了：为什么天空看上去不是更接近紫色？

他咯咯地笑了，接着说道：“其实，某种意义上讲就是紫色的，只是

你看到的有所不同。你的眼睛对紫色的敏感程度不及蓝色，而你的大脑也不会像光谱仪那样分析光线。你抬头看到的天空，有一部分已经过了你自己的处理，然后只是用‘蓝色’这个词代表你观察到的颜色。”

根据博伦的测量，在晴朗的中午，天空光中只有1/5的光线是真正的蓝色。“甚至爱因斯坦在研究光的散射时都忽略了这一细节，因为他从未真正看过天空光的光谱。”

那么，究竟空气分子是如何散射光线的呢？

他停顿了一下，说道：“如果你确实想了解这一点，那就需要先弄清楚电子云在被快速振动的光波击中后，会有什么样的反应。电子相对于原子核的运动会产生电磁扰动，其波长或者说其颜色与入射光的波长有关。空气分子同时会与很多光波产生这样的作用，但它们对蓝光与紫光的散射作用比其他颜色——比如说红色或黄色——更明显。”

换句话说，氮气分子可以对全波长的太阳光进行散射，就好比如果你有朋友在音乐厅偷偷地给你打电话时，手机里也会传来很多交响乐的声音一样。然而手机上的微型喇叭在传递小提琴的高音部分时，会比低音鼓的浑厚声响更为清晰；大气中的细小分子也是如此，它们会更热衷于散射短波长的光，比如，蓝光和紫光。我们对天空中“音更高”的紫色会有一些音盲，但我们还是可以从同样灿烂的蓝色中感受到很多乐趣。

在低层大气中，每一秒钟都会发生几十亿次散射过程，考虑到人类视力的局限性，最终你所能感知的，便好像是一群发着蓝光的分子“蜜蜂”。大气散射的影响巨大，它使你不能在白天看见星星，也是它使你可以在太阳落山很久之后还能看到书上的字。在我们头顶之上的这个看似不透明的穹顶，远不止是一层被动的天花板：它因自己的原子发出的光而发光。不过到头来，天空之所以呈现蓝色还是由你的感官决定的。

空气中的氮如何转化为我们的肉体

尽管氮元素只构成你身体总重的3%，但是在那些让你的外形和动作都独一无二的分子中，它们却是关键成分。你身体中的碳水化合物和脂质主要由三种元素构成，也就是构成二氧化碳和水的碳、氢、氧，但要想形成几千种蛋白质维持生命，你还需要将氮加入其中。你肌肉干重的10%～15%都是氮原子，而在你血液里的血红素中，是四个氮原子搭建成一个摇篮环抱着一个铁原子。你身体中所有的酶、抗体和基因都含有氮原子，神经元中的离子泵还有鼻子中的软骨也不例外。如果食物中没有氮原子，只利用碳、氢、氧三种元素，你顶多只能构建出脂肪和体液。

让氮气对阳光做出散射的电子云，还需要有一种细胞，其中含有一些像扳手一样的特殊分子，能把氮气分子致密的电子云拆解开，并利用这些被拆分出来的原子碎片做点别的事。对我们来说很幸运的是，有些生物就拥有这样的细胞。一些寄生在桤树灌根中的微生物就可以从事类似的工作；但全球最主要的固氮微生物还是各种各样的蓝细菌，它们或是住在浮游生物体内，或是存在于地衣褶皱的组织中；还有就是寄生在苜蓿、三叶草与大豆等植物根部的土壤细菌。由于这些细菌和它们寄主的联姻，种上几亩苜蓿就如同是播撒了氮肥一般。

固氮细菌中的分子扳手是固氮酶，一种含铁的酶。固氮酶会将氮气分子一分为二，然后给每一个氮原子配上三个氢原子，从而形成在生物学上很有用途的氨。不同于一般化学物质，固氮酶这样的酶都非常稳定，不会在反应中被消耗或中和，只要能量与原料持续供应，它们就会一直完成自己的任务。

长久以来，这些固氮细菌垄断了含氮化合物的生产，为了获取氮化合物，地球上的其他生物都要有求于它们，因此如果按照人类的商业逻辑，它们一定会成为最富有的企业联盟。然而，根瘤菌的需求仅仅是免费而舒适的地下居住环境，至于水生蓝藻，也只是利用化学防御来惩罚那些打算以它们为食的生物。





你身体中氮原子的两种潜在来源。上图：含羞草，一种热带豆科植物，其根瘤部位有固氮细菌寄生。下图：显微镜下的鱼腥藻，一种生活于湖泊中的蓝藻细菌。图中显示，在一串细胞的中心位置，一个膨胀的细胞正在固定氮气。照片由科特 · 施塔格拍摄

除了细菌以外，只有闪电是值得关注的非人工氮源。闪电的厚度未必有你的拇指粗，却比太阳表面的温度还要高。超高温度将氮气分子从中撕开，从而给了氧气与自由氮原子结合的机会。每一次撕开空气的轰击都会留下一些氮氧化物，它们扩散到大气中，最终随着雨雪降落到地面，经植物吸收后进入不同的食物链中。几乎可以肯定的是，你和其他大多数生物一样，此时此刻就携带着这样的闪电灰烬。

日常生活中能够遇到的氮元素多数是看不到的，这也使得我们很难建立起跟它有联系的直观感受。不过只需要一点科学知识和正常的想象力，你还是可以透过熟悉的表象探知更为深刻的原子真相的。为了便于说明，这里要说的是一个你非常熟悉的场景——经典电影《绿野仙踪》里的堪萨斯龙卷风——氮元素就隐藏于其中。

狂风在越来越暗的天空下肆虐，浓云中一条强健的触手像游蛇一般伸向一片可怜的农场，还有一栋小屋和谷仓立在农场与烟囱之间。扭曲的龙卷风不断逼近，人们混杂在鸡崽马匹中间跑向掩体。现在请按下“暂停”键，看看此刻氮原子正在做些什么。

这部电影的场景还是用黑白胶卷拍摄的，所以即便不是浓云密布，你也看不到长锥形的漏斗云背后那一片蓝色天空。不过无所谓——空气的运动比它的颜色更足以引发思考。在这种毁灭性的狂风之中，大部分作用力都是飞行中的氮气分子在寻找庇护所时对地面和剧中角色的冲击。强烈的气流主要是由高空中氮气分子不平衡的热运动所引起的，太阳照射带来的升温作用，让原子在不断上升而膨胀的空气中加快了舞蹈节奏。当分子运动更快的热气流遭遇堪萨斯上空分子运动较慢的寒冷气流时，由此产生的激烈冲突，就孕育出了灾难性的暴风。

闪电也可能在电影里的同一片云中出现。每一次爆炸性的闪电都会在湍流的空气中留下一串氮氧化物，其中一部分氧化物会溶解到雨滴中，被土壤所吸收，随后帮助那些在灾难中幸存下来的庄稼生长。

这幅场景中看不到的是，那些富含氮元素的气体正在从田野中不断升腾。土壤中的细菌会将前一年的农业废弃物分解，在给土地施肥的同时，也不断将蛋白质分解散发到空气中，而那里也正是孕育这些蛋白质的源头。而在谷仓背后的厕所中，细菌也在做着同样的事。

农场上堆着的干枯秸秆中也藏着些氮原子，残留在那些曾是绿色的叶绿素中。鸡群在晒场上一边奔跑一边鸣叫，而它们羽毛的角蛋白中，氮元素还要更为丰富一些。

这部电影的开头是埃姆婶婶在大风中呼唤桃乐茜，富含氮气的风掠过她那花白头发中富含氮元素的角蛋白。桃乐茜呢，在这场令人目眩的大风中瑟瑟颤抖，富含氮元素的肌肉疲于应付，甚至不能再对婶婶那穿越氮气的声波做出回应。她的小狗托托比她还要害怕，因为它那锋利的角蛋白之爪正牢牢地扒在地面上。

现代社会里，同样的氮元素关系仍然操控着你身边的一切，还比电影场景中多了些新东西。机动车引擎的火花塞就像是微型的闪电，它们对氮气的作用也类似于闪电。平均每一天，你会吸入将近3000加仑含有氮气的空气，这相当于36个大浴缸的体积。而相比之下，一辆普通的紧凑型轿车每小时可以吸入30倍的量，如果在一年的时间里你驾驶着它开上12500英里（2万千米），那么它可以产生大约18磅（8千克）的氮氧化物。大货车的吸气速度是小轿车的4倍，而一架飞机更是相当于它的100倍。所以你也就能明白，为什么机动车尾气会与火力发电厂的废气一样，成为如今全球氮元素循环的主要来源。

加拿大气象学家路易斯·波林（Lewis Poulin）估算，2001年，蒙特利尔市内及周边的机动车每天排放的气体，大约是其180万市民总排放量的175倍。不过与人类将氮气分子吸入后又原封不动排出的过程不同，经过超高温发动机缸的很多氮气分子都形成了氮氧化物。美国环境保护局的科学家经过调查后发现，在常年流行的西风作用下，大西洋沿岸的每一座大城市都会将含氮废气和其他污染物一起远远地输送到海上。而这些东部城市，又处在深入内陆的城市与高速公路下风口，类似的废气也会向着它们飘来。

如今，这个星球上大约一半的生物质氮元素，包括你身体中的大部分，都是通过燃烧化石能源从空气中提炼而来，然而这一工艺最初的工业化生产，却是出于给“一战”期间的德国提供炸药的目的。这种人工固氮工艺的最终产物，可以是从TNT（三硝基甲苯）到笑气（一氧化二氮）的各种物质，甚至化肥（硝酸铵）也在人类的“努力”下，被用于从

抵御饥饿问题到恐怖爆炸案的方方面面。所有这些都是一个人的遗产，这也使得他成为人类历史上最有影响力的人物之一。

能做面包也能做炸弹

1868年，弗里茨·哈伯出生于东普鲁士的布雷斯劳（现名为弗洛茨瓦夫，属波兰），是个商人的儿子。根据传记，他是一位杰出的科学家，一位不称职的丈夫，也是一位狂热的爱国分子。这些不同特点集于一身，也可以更好地解释他的生命轨迹。就像他关于勤奋工作与公民义务的理念那样："我宁可精疲力竭，也不愿闲得生锈。"

与爱因斯坦一样，哈伯也是德裔犹太人。但不同于爱因斯坦的是，他皈依了基督教，从而在一个反犹太情绪日益高涨的社会中获得了更大发展。1905年左右，哈伯发现了一种可以生产液态氨的方法——将氮气与氢气在高温高压下混合，利用铁催化剂促进反应，和细菌中固氮酶的反应方式非常相像。到1909年时，他和英国物理化学家罗伯特·勒·罗西尼奥尔（Robert Le Rossignol）一起开发了一种高压设备，可以滴出氨，而且其产量很可观。尽管当时他已在科学界赫赫有名，但是对这一工艺的完善，使得哈伯进一步成为公众名人。

当时，德国用于化肥与炸药的最主要氮源是硝酸钠，一种产自智利北部沙漠浅层的岩盐。这种沉积物极度罕见，而它们的来源至今也还保持着些许神秘。硝酸钠易溶于水，所以它们只会在智利沙漠这种极度干旱的环境中富集。在美国内务部1981年发表的一份报告中，地质学家乔治·埃里克森（George Erickson）推断，这些奇怪的沉积物是数百万年以来，由海洋盐雾、火山喷发以及岩石土壤风化的产物集聚而成。要想让这么多对生物有效的可溶性氮元素以同样的方式生长，地球上其他地区都过于潮湿，植被也过于繁盛。对于埃里克森来说，发现这种足有一英尺（0.3米）厚且部分纯度超过50%的化肥，其惊讶程度不亚于在露天发现一块巨型"糖田"，而这块"糖田"居然没有被雨水冲刷或是引来大群饥饿的蚂蚁。

不管源自何处，这些智利硝石自19世纪初就已让前来开采的人们大发其财，到20世纪初时，美国与英国也已经非常依赖这些大型的硝石矿。随着"一战"的阴云愈加逼近，正是单一来源的不稳定性以及从智利

启程的漫长船期，促使哈伯的发明为德国带来了转折。

在1909年到1913年间，哈伯和他的助手、化学家卡尔·博施（Carl Bosch）将前述反应进行放大，实现了工业生产，也就是广为人知的哈伯—博施合成氨法，从而将大气本身变成了一座巨大的氮元素矿。关注合成氨农业应用的人们不吝溢美之词，说这是在“从空气中生产面包”。但氨气也很容易转化成硝酸用于炸药的生产，因此战时，哈伯的祖国对这一新工艺的渴求胜过了一切。从另一个角度讲，由于氮源不再受地理局限或是依赖根瘤，血腥的战争也变得更为持久了。

一种可以用作肥料促进生命发展的物质为何又能如此暴力地摧毁生命呢？硝酸盐可以利用自身的氧原子作为氧化剂快速起火，于是很平常的缓慢燃烧也会演变成野蛮的爆炸。将硝酸钾、木炭和硫黄按照不同比例混合，你可以得到各种形式的黑火药，它们曾经在兵器和烟火中被应用了很长时间。

18世纪时，法国化学家让-安托万·夏普塔尔（Jean-Antoine Chaptal）命名了氮元素，而他起名的依据便是这种元素存在于硝石中（硝石当时的法语为“nitre”，氮的法语为“nitrogène”，意即由硝石产生）。硝酸钾中的硝酸根，其实由一个氮原子与三个氧原子构成。当黑火药中的硝石遇到火花时，其中的氧就会直接与其他可燃物发生反应，一切似乎都会在瞬间发生。可燃物爆炸生成二氧化碳、水蒸气和含硫气体，膨胀速度快得让人难以想象，同时伴随着光和热。因此，枪支中的火药粉末爆炸时，便会推着子弹从枪管中迸出，丢失了氧原子“行李”的氮原子也会以氮气的形式喷出，再次回到它们最初被固定的源头——大气圈。

当你消化食物中的蛋白质时，氮元素最终会以尿素的形式被排出体外。细菌随后会将尿素转化为氨气，进一步再将其氧化成适用于爆炸物的硝酸盐。美国南北战争期间，资源匮乏的南方同盟军有时会采用草木灰（可获取钾）和尿素（可获取氮）来生产火药。根据音乐家兼作家里奇·皮特曼（Rickey Pittman）的个人网站，当时从谷仓到夜壶的各种尿素氮源都被开发利用了。

皮特曼引用了一份由政府代表约翰·哈拉尔森（John Haralson）起

草的公开通知，其中写道："恭请塞尔玛的女士们保留好尿液，以备生产硝石之需。每日将送来大桶一只以便收集。"诗人们很快从这件事中获得"灵感"，当时有一首歌的结尾就是下文中的这段猥琐打油诗：

约翰·哈拉尔森哪，拜托你搞点干净的发明；

你的硝石啊，多少都有那么点上不得台面！

这龌龊的主意哟，约翰，是火药，也是疯狂；

每当太太们掀起裙子时，就能射死那些北方佬！

科学天才与战争魔鬼

通过从空气中直接固定氮元素，弗里茨·哈伯让现代战争发生了革命性变化，也因此成为民族英雄。你或许会以为，他这一科技教父的形象也会在家庭中得到延伸，毕竟他的妻子克拉拉也是一位很有天赋的化学家。但他们的关系其实非常紧张，因为哈伯似乎非常渴望满足祖国对他的要求，而不管它们是否符合道义。

哈伯并不认同爱因斯坦的和平主义哲学，反倒很愿意将他的研究应用于军事方面。他的观点是："科学家在战时属于他的祖国，而在和平年代则属于全人类。"当他就职于新建的威廉皇家物理学与电化学学院——如今以他的名字命名——期间时，他协助发展并监督了毒气在战争中的使用，将其作为将盟军从战壕中赶出来的手段。他时常讲，这种毁灭性的战略，可以让德国快速获胜，最终那些可能因长期动乱而丧命的人将会因此而获救。然而很不幸的是，他判断错了。

对于克拉拉而言，丈夫的激进已经开始超越底线，成为恶魔的同谋了。根据吉尔伯特·金（Gilbert King）在《史密森尼》杂志上的一篇文章，无论在私下还是公开场合，克拉拉都宣称其丈夫的行为"野蛮"，是"对科学理想的扭曲"。而哈伯的回应则是指责她背叛了祖国，这也使得他们已经很脆弱的婚姻关系雪上加霜。

最后一根稻草，是1915年春天哈伯在弗兰德斯对盟军首次使用氯气的战役中以个人身份进行了指挥。一位幸存的加拿大士兵后来回忆起德国氯气战时如此说道："有种溺死的感觉，只不过是在陆地上而已。肺部像是在被刀刃划伤，不停咳出绿色的浓痰，最后失去意识直到死去。"毒气战引起的后果惨绝人寰，当克拉拉听说了这一切之后，默默来到自家后院，举起手枪朝自己的胸口扣响了扳机，直到他们13岁的儿子赫尔曼发现她倒在血泊中的尸体。次日早晨，为了视察东部前线的毒气施放情况，哈伯又离开家，留下赫尔曼独自悲伤。




左图：克拉拉·伊默瓦尔·哈伯。右图：弗里茨·哈伯。
感谢柏林达赫姆马克斯一普朗克学会提供的档案

对于自杀，尽管克拉拉并未留下只言片语的解释，但还是可以认定哈伯应该对此负责。毫无疑问，他的家庭生活不尽如人意，这其中至少有一部分原因是他将雄心和祖国放在了至高无上的位置。然而当战争结束以后，哈伯更多地致力于和平目标了。20世纪20年代的大部分时间里，他都在尝试从海水中提取黄金为德国挽回战争期间丢失的颜面，并提议通过化肥和杀虫剂将苏丹沙漠变成“农业伊甸园”。

然而最终，哈伯为之奉献一生的国家还是背叛了他。1933年，希特勒开始掌权，纳粹的种族制度开始驱赶犹太科学家，其中不乏一些德高望重的人士，连爱因斯坦都被迫和其他一些人移民到了美国。有一天，当这位曾经开发了固氮技术的英雄来到供职的学院时，却被门卫给打发了，并被告知“犹太人哈伯不许入内”。他只好辞职，把自己放逐到了英国。毫不意外，出于他在战争中的所作所为，英国科学家都对他避而远之，于是他只好前往瑞士。根据传记作家莫里斯·戈兰（Morris Goran）的记载，哈伯的一位朋友说他的战后生涯就像是“75%的死人”。1934年，弗里茨·哈伯历经磨难，因心脏病离开了人世。在他辞世之后，他的

老友爱因斯坦意味深长地总结道：“哈伯的一生就是德裔犹太人的悲剧——也是无回报热爱的悲剧。”

有些人认为他还是幸运的，毕竟他没有看到在他死后，他的那些成就给这个世界带来了什么。最残忍的讽刺是，哈伯及其团队在威廉皇家学院开发出的含氮杀虫剂齐克隆B，最初用于保护农作物，最终却在毒气室中被纳粹用来处决了数百万犹太人，其中也包括哈伯的一些前同事和远房亲戚。1946年，赫尔曼·哈伯也自杀了，据说也是因为羞愧于他父亲在战时的这些研究。

如何去评价这样一个人的生平？

温斯顿·丘吉尔在1918年的一次国会演说中如此评论：

如果不是哈伯教授的发明，很难想象德国在硝石储备耗尽之后还能继续进行战争。他的这一项发明，让他们……不仅可以为各种目的几乎无限地供应炸药，也可以为农业增长提供充足的化学肥料。这是一个值得我们瞩目的事实，因为这显示了，如今的科学发现可能会有意无意地改变整个世界的命运。

如果严格从数字上来评价，恐怕哈伯对近代历史的贡献还是正面的。在20世纪里，战争和灾难造成了超过1亿人死亡，或许从理论上讲，由空气生产的化肥对消除全球饥饿的作用可以与其相抵消。如果没有人工固氮技术，恐怕当今全球70亿人口中的一半都不会存在，原因很简单，因为没有足够的氮原子去构建和维持他们的身体。上述比较的结果如何，取决于如何考量诸多因素，而且也存在争议，因为更多的人口也就意味着世界上的污染与冲突的增加。

不管你如何评判，哈伯—博施合成氨法无疑是将我们从古代细菌垄断集团的限制中解放了出来。如今，全球每年的合成氨产量已经超过1亿吨，而且和其他固氮生物一样，我们也在向环境中排放着很多形式的含氮废气。感谢哈伯所做的贡献，借助于现代文明的这些科技，我们如今可以通过一些史无前例的细节探索这些原子间关联。

鲑鱼洄游和氮的食物链轮回之旅

我们常听说“人如其食”的俗语，而一些具有开创精神的生态学家现已证明，在北美洲西北太平洋的荒野地区，确实存在这样的原则。不过，他们主要的研究对象不是人类，而是鲑鱼。

红鲑鱼一年一度的洄游，其实是从海洋溯流而上前往遥远湖泊的长途迁徙，在那里完成产卵后便会死去，它们的惊人之举也时常被用来激励人们面对逆境时要有决心。相比那些沿着曲折海岸在密布森林的水域里生活了几千年的居民来说，它们的确更有“决心”。毫不夸张地说，鲑鱼已经成了那里生命基础的一部分。而氮元素，或者更具体说，较重的氮同位素让科学家们又可以讲述这个古老故事的新版本了。

当你望着满是鲑鱼的河流时，你的视线很容易就会在混乱中跟丢其中的某一条。为了解决这一问题，生物学家采用标签对特定的鱼进行标记，从而可以弄明白它和同伴们的行迹、它们的寿命，以及整个群落被捕捞的比例。不过如果你想深究鲑鱼的故事，那么一般的标签还是不够用，因为当鲑鱼死亡时，标签会脱落并遗失。于是，一种新型的标记方式派上了用场，我们可以借此跟踪鲑鱼的氮原子，直到这些鱼进了森林居民的口腹，最后回馈给森林本身。

加拿大不列颠哥伦比亚省维多利亚大学有一位生物学家，他的研究课题是鲑鱼与氮原子特性之间的联系，这一切首先开始于腐烂海草的气味。

“这种气味你肯定也熟悉，就是当你在沙滩上散步时闻到的那股海腥味。”当我给汤姆·莱莫什（Tom Reimchen）打电话时，他如是说道，“海草腐烂的时候，细菌将它们降解，就会释放出氨气还有其他气体。海洋中其他区域如果有什么东西腐烂时，也会发生同样的事情。”对于莱莫什和他的团队而言，这些分子中的同位素分布比例，让追踪生态系统中的鲑鱼原子踪迹成为可能。

“氮有两种同位素，其中一种略微重一些，所以向空气中逸散的难度也会略微大一些。这点差异使得重同位素更易于在海洋中积累。”他继续补充道。

尽管你也许会猜想，原子看起来大概会和一群鱼那样整齐划一，但同位素的存在却说明事实并非如此。氮15比氮14多一颗中子，质量也就略大一些，比起更为轻盈的弟兄来说，氮15也显得略微迟钝一些。对莱莫什这样的科学家而言，氮15的迟钝却是件好事。

“较重的氮15比氮14的振动略微弱一些，因此当它和其他原子之间构成化学键时，也就更为稳定而不易被破坏。腐烂海草散发出的氨气，其中的氮14含量更为丰富，因为微生物将它们从蛋白质分子上摘落的难度更低，这样氮15就会被遗落在海洋中。”同样的事情在海洋食物链系统中也有发生，从被捕食者到捕食者的每一级，氮15在器官组织中的含量都会有所提升。单细胞的藻类从死去的海草那里获取含氮化合物，这些食物分子转化为藻类细胞的过程中，氮15相对于氮14的含量也会有所提高。小型浮游生物吃掉藻类，氮15含量又一次升高，小型鱼类又吃掉浮游生物，效应也因此不断累加。红鲑鱼几乎处于食物链的顶端，它们只会在氮15非常丰富的海域中捕猎，所以在它们的身体中，会携带含量明显较高的氮15同位素。科学家研究发现，在红鲑鱼的身体组织中，氮15的丰度超过大气及地壳中的10倍。

“相比淡水鱼，在海洋中生长的鱼类含有更多的氮15，”莱莫什解释道，“而且食物来自海洋的各类生物，氮15的含量也要比那些生活在陆地上或一般河流湖泊中的生物更高。”因此，鲑鱼组织中的高浓度氮15含量在一个前所未有的角度揭示了“鲑鱼森林”与海洋的微妙原子关系。

变身是一个在世界范围内广泛流传的古老神话。在这些传统故事中，女巫会变成黑猫，多毛的人会变成狼人，而吸血鬼则会变成蝙蝠。我们也许会被这些故事逗笑，但是像莱莫什这样的科学家却不会，在原子王国里，鱼类会变身成为熊、狼、鸟，甚至人类，沧海也会变成森林。

夏洛特皇后岛（也被称作海达瓜依岛）就坐落在不列颠哥伦比亚省的海岸外围，年复一年这里都会吸引迁徙的鲑鱼游进河里。在《生态林

业》上发表的一篇文章中，莱莫什指出，夏洛特皇后岛上的一头黑熊可以在夏末秋初的六周时间里——也就是鲑鱼的产卵期里——捕食大约700条鲑鱼。通常黑熊会带着战利品来到丛林中独自享用，只吃掉最美味的部分，然后就再次返回捕猎场，剩下大堆残余的鲑鱼尸体。在原子王国里，食物很少会真正变成废物，黑熊没有吃掉的部分很快就成为鹰隼、乌鸦和海鸥的晚餐。几天后，残余的软组织和动物粪便又成了蜂群、苍蝇和细菌的乐土，并被转化为含氮的废物。用莱莫什的话说，腐烂的垃圾已经让河边森林成了一片“臭不可闻的水岸区域”。

与黑熊一样，在不列颠哥伦比亚省一年一度的鲑鱼迁徙期间，灰熊的氮元素摄入也几乎完全依赖于鱼类的蛋白质。敏捷地刺入，紧扣双颌，甩一甩厚重而潮湿的毛，这位成功的猎手便将猎物拖进了丛林之中。撕开鱼皮，橙色或粉红色的鱼肉便露了出来，灰熊大口将鱼肉蛋白送到胃里，在那里守候多时的酶开始工作，将其分解为小分子的氨基酸。从食物中获取的氨基酸，顺着捕食者的血管来到肝脏，在这里它们中的大部分都被加工成各类原料，用于构建肌肉、筋腱或其他身体组织。超过每天生长或新陈代谢所需的部分，都会被分解成氨，并被转化为尿素排出体外。这些需要丢弃的含氮化合物，九成都是通过肾脏过滤，并由尿液排出，其余部分则主要随着固体排泄物离开身体。当你咬下美味的鲑鱼并将它们的原子据为己有时，类似的过程也会在你的身体中发生。

如果这头熊是哺乳期的母熊，那么很多没有被用上的氮原子，就会用于构建乳汁中的蛋白质，而身体通常会将大多数氨基酸用于毛发及其他部位的生长。根据一项研究，熊的毛发中有80%的氮原子都可以追溯到海洋中。新生毛发纤维中的这种原子信号，不仅出现在鲑鱼迁徙的秋季，也出现在春季到夏初的这段时间，此时熊的食物来源主要是植物而不是鱼。来自海洋的氮原子，已经滋养了整个森林，而不仅仅是熊了。

植物用氮原子构造能够捕获光子的叶绿素，并因此成了绿色，此外也用它们构建酶、细胞壁以及香味物质。在鲑鱼洄游的溪流边，植物从土壤中吸收的大多数氮元素，都是黑熊们搬运上来的鲑鱼蛋白，而且莱莫什和他的团队通过测定发现，当地越橘、野生杜鹃以及美莓（这种植物的命名恰到好处，因为它的英文名salmonberries直译过来便是“鲑鱼

莓”）中氮15浓度都比较高，这也显露了其原子是来自海洋的同位素特征。类似的研究还发现，北太平洋沿岸的各分水岭都有同样的现象，叶片中的氮15含量可以反映植物与溪流的距离，以及鱼群密度和熊群规模等。

然而不幸的是，通过氮原子的这张食物网络，海洋也给我们送来了一份沉重的“大礼”。根据环境学家珍妮·克里斯坦森（Jennie Christensen）及其团队的研究，落入太平洋的大气污染物最终也会使鲑鱼遭到污染。他们得出结论认为，洄游的鲑鱼体内，可以检测出多达70%的有机氯杀虫剂类别，而在以鱼为食的灰熊体内，则可以检出多达90%的有毒多氯联苯物质类别。他们总结道：“由此可见，这些陆地食肉动物与北太平洋的污染物形成了紧密关联。”

再回头看看鲑鱼的残余尸体。狼群、鼬鼠和狐狸将其他的鲑鱼氮原子带到周围，而鹰隼和乌鸦则会将它们带到更高的树丛中。有一些氮原子还多绕了一个环节，经过食腐昆虫进入鸟类体中，最后又变为鸟粪回到地面。即便是在最终剩下的鱼骨中，含氮物质也会在细菌的作用下缓慢地分解成氨气和硝酸盐进入土壤，在那里，真菌纤维会将它们送抵树木的根部。

在莱莫什所研究的溪水边有一排排云杉和铁杉，它们树干中所含的氮15，比起那些生长于山坡上方或上游的树来说都要高多了，那些地点因为坡度或瀑布阻挡了鲑鱼的洄游。不列颠哥伦比亚省河边植被中所含的氮元素，差不多有40%都是来自被熊捕获的鲑鱼，而在鱼群最为密集的一条滨海溪流中，莱莫什估测在迁徙规模最大的那几年，该区域的云杉当年所需的氮，竟有3/4以上都来自于鲑鱼。

研究发现，氮元素可以让植物生长得更快更茂盛，因此有些研究者就将年轮作为鲑鱼洄游规模的记录。渔业研究一般只会覆盖几年或几十年而已，但云杉、冷杉和铁杉却往往生长几百年，每一年都会在树干的最外层增加一圈。通过测量河边树木一圈圈年轮中的氮15丰度，华盛顿大学的研究者发现，在过去的350年里，鲑鱼洄游的规模起伏很大，即便在现代人类对其造成影响之前也是如此。但鲑鱼历史的最长记载还是要从湖里挖掘，那些从捕食者口中逃过一劫的幸存者在这里结束了它们

华丽的旅程。

当红鲑鱼奋力游到溪流的最上端，回到它们出生时的地方时，雄鲑鱼便失去了它们银色的光泽，鱼鳍变得通红而头部却呈现绿色，弯曲的下颚凶相毕露，准备争夺地盘与配偶。鱼群抵达一片湖泊之后会开始繁殖。雌性鲑鱼在背阴的位置产下鱼卵，而雄性则通过打斗赢得繁衍的机会，获胜者可以在临死前将牛奶状的精子洒落到巢穴中。不久后，湖底便布满了决斗者的尸体，它们腐烂后向这片水下版的“鲑鱼森林”释放着氮原子。

水藻将这些含氮化合物消化，然后自己成了小型浮游生物的食物，这又给新出生的鲑鱼提供了一顿大餐。在新生鲑鱼往返于太平洋开启属于自己的新一轮旅程之前，它们会花上几年的工夫，依靠它们祖先的原子增加体重。所有这些过程中，腐殖质与死去的浮游生物形成薄薄一层，在酥软的湖底淤泥上富集，而这层状的沉积物就好像是树干中的年轮，可以揭示出数千年的鲑鱼历史。

《自然》杂志2002年发表的一篇论文中，生态学家布鲁斯·芬尼（Bruce　Finney）和他的团队介绍了他们在一块沉积岩芯中的发现，岩芯挖掘于卡鲁克湖（Karluk Lake），一处位于阿拉斯加科迪亚克岛的野生红鲑鱼繁殖地。在过去的两千年中，沉积物中的氮15含量与硅藻的玻璃质细胞壁含量同起同落，因为硅藻在鲑鱼洄游规模很大的年份也都会爆发式繁殖。不过相比于记录的久远和细节而言，更令人吃惊的还是它们揭示了现如今的种群数量。

像现在这种种群数量长期下降的现象并非我们这个时代所独有，两千年前还出现过更大幅度的下降，并一直持续了好几百年。我们到现在为止还不知道具体是由什么原因引起，不过芬尼的团队认为这可能和气候、太平洋洋流以及海水表面温度的波动有关。

更多的问题在这些发现之后被提了出来。鲑鱼的数量“究竟”有多少？过去曾经有报道称，河水中的鲑鱼太拥挤以致人们可以踩着鱼背过河，这是否只是“大鱼”传说？商业化捕捞在这个地区兴起以后，鲑鱼种群反而比过去数千年更庞大了。这种巧合会不会让我们对未来预期产生错觉？

这些研究说明，对于鲑鱼以及它们在太平洋西北地区“氮经济”中的地位，我们还需要进行更多了解。而且并不意外，类似的研究已经开始了，并逐渐揭开了很多我们自己与世界之间的氮关联。

远古人类的食谱

人类历史上大多数时候，我们的祖先与环境之间的原子交换其实都非常接近于“鲑鱼森林”，而且这可以在人体中通过同位素标记进行追踪，就像莱莫什的研究所观察到的一样。

考古学家会通过对骨骼中最丰富的胶原蛋白进行氮15同位素分析，从而构建出远古人类的食谱。在一项类似的研究中，厄尔·纳尔逊（Erle Nelson）和他的团队在格陵兰岛南部发掘出了早期挪威定居者的骨骼，并分析了他们15世纪在此处定居失败的原因。不少专家提出，原因是由于环境变冷，也就是所谓的“小冰期”，气候变得过于恶劣。其他专家则认为，他们可能固执地拒绝接受当地因纽特人的生活习惯，不愿以打猎捕鱼为生，最终土地退化与粮食歉收导致了他们的死亡。2012年，纳尔逊团队研究了格陵兰岛埋骨之地的原子组分，以检验这些富有争议的猜测。

他们的同位素分析证明，格陵兰岛上的挪威人，食谱中有很多鱼和海豹肉，这使得“气候致死说”与“粮食歉收说”都显得有些站不住脚。与太平洋西北地区的熊一样，以海洋生物为食的人群相比那些以粮食或家畜为食的人群，体内的氮15含量会更丰富一些。在格陵兰岛开展的研究表明，如果这些定居者是以面包为食，骨骼中的氮15含量肯定不会像测量值那么高。

所有的骨骼都是如此，只有一个例外。根据当地记载，此人出生在斯堪的纳维亚，加入移民大军后不久就死去了。结果，他的骨骼中仍然携带着大量农业性的氮原子，这是由他早些年在挪威吃的食物留下的。他体内较低的氮15含量也证实，在他死的时候，身体中的氮原子还没有完全被当地食物的原子所置换。

作者认为，这些早期定居者体内的氮同位素表明，格陵兰岛移民的消亡不太像是突发事件，而是一段缓慢的疏散过程。在哥本哈根大学的一篇新闻报道中，人类学家尼尔斯·林纳洛普（Niels Lynnerup）对此解

释道："没有证据表明挪威人的消失是自然灾害的结果。如果要说是什么原因，那可能就是他们对于在世界尽头啃食海豹的生活已经厌倦了。"出于对斯堪的纳维亚更发达的文化及社会环境的渴望，很多年轻人会先被吸引并前往，剩下的村民们最终也放弃坚守，离开此地。

捕食者消化另一个生物体中蛋白质的过程，体内会倾向于留下更多较重的氮15原子，这也使得捕食者体中的氮15含量通常会比猎物更高，而这一原理也适用于我们人类。1997年发表在《有机地球化学》的一篇论文提到，通过哺乳期的母亲与她们婴儿间的营养物质关系，可以揭开这种神奇的原子纽带。

当你还只是胎儿时，你所有的原子都来自你母亲的身体。你还不会自己吃喝或呼吸，只能通过脐带从胎盘获取或排出流体。说到底，当时你还只是你母亲身体的一部分。即便你在出生之后已经能够自行呼吸了，你还需要从母亲的乳汁那里获取其他的原子，除非你是喝配方奶粉长大的。

不过尽管你最初的原子都来自你的母亲，但你自己的身体中，氮15还是得到了轻微富集，这与熊的蛋白质相对于它们食用的鲑鱼氮15含量更高的原理相同。换句话说，你不仅仅是你母亲身体的一部分，你也在由她滋养。如果你乐意，你可以用捕食、寄生甚至同类相食这样的字眼来描述这个关系，因为不管怎么表述，对于你的氮原子同位素都是一样的，同时它们也在记录着你的所作所为，并将其写入蛋白质的分子档案中。

当研究者轻轻剪下哺乳期新生儿的指甲，并与其母亲的指甲进行对比时，他们搜寻到了母亲做出莫大牺牲的同位素证据。被捕获的鲑鱼并不情愿用它的氮15去喂食饥饿的黑熊，但哺乳期的母亲却是在无私地向她们的孩子提供自己的原子。遵循着古老的食物链原则，研究发现婴儿体内的蛋白质，其中氮15的含量会略微高于他们的母亲，直到他们断奶之后，同位素分布逐渐与今后将养育他们的更广阔外界环境趋于一致。最早显示独立的同位素证据出现在两到三个月后的指甲中，这也是新生儿的指甲从角质层生长到指尖所需要的时间。类似的同位素研究还发现，母亲的妊娠期可以在头发丝中体现，因为这时她的身体正在不断地

向她的孩子输送氮原子。

母亲与孩子之间的紧密联系，从很多方面也反映了我们与地球之间的原子关联。即便已经不再依靠胎儿期的脐带连接，我们也仍旧生活在这个由回收原子构成的“地球胎盘”中。不过如今，加入到这些原子连接网中的，不仅有生物，还有各种机器。

就在写作本书期间，地球上具备生物价值的含氮化合物，有一半都是由我们的机动车、农场和工业所生产。《科学》杂志2010年发表的一项研究显示，如今仅仅是哈伯—博施工艺这一项，就足以匹敌海洋与陆地上所有微生物的固氮总量。我们生活的这个世界已远非我们的祖先所能理解，甚至，我们大多数人都不再依赖农场了。

在电影《绿野仙踪》中的黑白世界里，农场产出什么，人们就只能吃什么，他们体内的氮原子都来自他们养殖的家畜或种植的粮食，以及偶尔发生的闪电。从土壤细菌到植物再到农民，然后再回到土壤中，氮原子一次又一次地回到同一片土壤中，马匹在此处犁过，将猪粪和其他废弃物翻腾到四处。即便没有龙卷风袭来，那段困苦时期也实在算不上什么完美的田园生活，不过我们能够从中学到一些更深刻的道理。他们都曾经是元素循环中的一部分，不过在如今的堪萨斯州，这种循环已经很大程度地被破坏了，就跟世界上其他地方一样。

如果你也和大多数美国人一样，那么你的全部食物也是几乎都来自超级市场，由工业化的农场供应。由此可以推断，你身体中的大多数氮原子，都是在某个离你居住地很遥远的地方由人工方法所固定。用于固定氮的主要能源是大量不可再生的化石燃料，将这些食物运输到你家周边商铺直至餐桌的能源也是它们。这些代价高昂的含氮化合物在排放后，并不会被农作物所吸收；其他的氮元素，通过牲畜的排泄物，进入污水池或是废水处理厂，反硝化细菌在那里将它们分解成惰性的氮气重新回归到空气中。这些过程让以人类为中心的全球氮元素循环出现了巨大缺口，而这个缺口只能通过能耗更经济的固氮技术和运输技术填平。

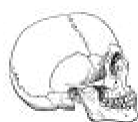
或许有人会辩解说，事情本来就该如此，因为这是保证庞大人口生存并远离饥饿威胁的唯一办法。不过长期来看，寻找更有效的一些方式闭合我们的氮元素循环不仅可行，而且也是有利的。将动物粪便还田，

用固氮植物给土地增肥，更仔细地调整化肥施用的时机和用量，这些都是如今在此循环中相对简单的推荐方案。

几十万年以来，我们的祖先吸收并利用这些同样的原子，然后又将它们排放到同样的一座“原子蓄水池”中，相信这个世界会满足他们所需，并稀释或分解他们产生的垃圾。作为目前地球上最主要的活性氮源，哈伯—博施合成氨工艺推动着我们跨入了21世纪，同时随着我们从大气中获取营养物质的能力不断提升，我们给全球氮循环带来的影响也在与日俱增。

生态学家大卫·辛德勒（David Schindler）在代表华盛顿大学接受采访时，对我们的处境做了简单描述：“对于氮而言，这个世界远比我们想象中要小。”当我们丢弃氮原子的时候，它们会依旧留在这个星球上，和我们在一起。如今，它们的规模与我们的其他垃圾一起不断增长。除了给粮食作物提供养分以外，我们排放的含氮垃圾也给我们带来了意外的后果，比如水藻暴发、酸雨酸雪和城区的有毒雾霾。它们甚至对气候变化也有贡献，因为过量施肥的田地、草坪、高尔夫球场以及化石燃料燃烧所产生的氧化二氮（N2O）是一种温室气体。生态学家亚历克斯·沃尔夫（Alex Wolfe）在接受一次线上采访时指出：“全球气候变化的争论主要都集中在对碳排放的讨论……（但）全球氮循环中由人为造成的困扰已经远远超出了碳的影响。”

作为一种迅速成熟而富有感知力的物种，如何权衡我们对固定氮的需求以及这种需求对水与空气质量的影响，还有我们的进化——是会互相促进还是互相残杀，这些都将是人类前进之路上上演的伟大故事。而且不管故事在未来如何发展，弗里茨·哈伯这项颇具两面性的遗产都将继续在其中扮演重要角色，毫无疑问。



我们将土地视为属于自己的商品，故而会滥用。如果我们视土地为我们居住的社区，那我们就会开始怀着爱和敬重去使用它。

——阿尔多·李奥帕德

（Aldo Leopold，美国著名生态学家，

所著的《沙郡年记》引起公众对“土地伦理”的关注）

绿色植物通过把地下的水、矿物质与天上的阳光、二氧化碳混合起来，连接了天和地。

——弗里乔夫·卡普拉

（Fritjof Capra，美国加州大学物理学家、生态学家）

钙与磷的传奇

并不是每天都会有人给你送上一根史前人类的指骨。

但1988年，这样的事情在我身上发生了，当时我正作为青年科学家在肯尼亚北部完成一项《国家地理》杂志分配的任务。当我前一天抵达内罗毕的国家博物馆时，居然遇到了古人类学家理查德·利基（Richard Leakey），要知道，我可是看着他的电视节目和文章长大的。后来没多久，他乘坐的一架小型飞机发生坠机事故，而他在意外中失去了两条小腿。不过我去考察地点乘坐的这一趟飞机在碎石沙屑之上掀起一阵尘土后安全着陆了，稳稳地降落在炎热干燥的图尔卡纳湖（Lake Turkana）西岸，在这里我将见识到所有人类与地球间的原子联系。

从空中看，图尔卡纳湖就像是一条满是泥沙的蓝绿色缎带，延伸了足有170英里（270千米），北边连接了奥莫河河口，而南边则是熔岩与火山口的天然屏障。湖泊的形状是由“东非大裂谷”雕琢而成，这是非洲大陆上一条从红海延伸到马拉维的巨大板块裂痕。这汪内陆湖含盐量高，并不能作为饮用水源。但是对于那些赶着牛、羊和骆驼行走于严酷沙漠地区的图尔卡纳人来说，这里就是家园。至于像利基和他同事这样的科学家们，这片地方也打开了人类所有历史的窗户。

当我们接近图尔卡纳湖西岸化石营地的临时跑道时，我能感觉到湖泊以前应该比现在大出很多。曾经的沙滩上分布着平行的条纹，一直延伸至那些拦阻湖水的荆棘、低矮峭壁和干燥峡谷才消失。

“从湖岸向外走得越远，”飞行员一边驾驶飞机从几座帐篷上空盘旋而过一边解释道，“你追寻的历史就越久。现在这个位置的湖床，大概有几千年，但那边远一点的地方就接近200万年了。如果继续走到地平线上那些山头的位置，你就走在恐龙时代的化石之上了。”

湖底沉积物是寻找“老骨头”的好地方，因为在这里它们避免了被动物啃食，也不易风化。时过境迁，湖底淤泥中坚硬的矿物质也会部分或

全部替代骨骼中的原有物质，即便后来再被埋入土中也不会腐化。仅仅因为这一点，图尔卡纳湖西岸就吸引了众多科学家，而且此处埋藏的不少化石可不寻常，所以当它们被发掘的时候，震惊了整个世界——这里埋藏着和我们关系最为亲密的原始人类的化石。

当地质学家弗兰克·布朗（Frank Brown）领着我从营地来到不远的一处新发掘点时，遥远历史的证据随处可见，他不时停下脚步向我介绍其中一些。

“看见那里的砂岩了吗？”我点了点头。“上面的波纹说明这个位置曾经是浅水滩。”

“你怎么看上面那些小小的碗形印记？”我完全没有头绪。

“是巢穴。那是鱼刨开沙子存放鱼卵的地方，就像如今它们的一些后代在非洲湖泊中所做的那样。好了，你看那边的块状构造又是什么呢？”

我小心翼翼地来到一堆半埋于土中的颅骨中间，每一个都差不多有倒扣的洗衣盆那么大。

“它们是叠层石，是微生物形成的礁石。当这片地方还被湖水覆盖的时候，藻类和细菌用水中的矿物质一层一层地将它们堆了出来。”

更吸引我的还是那些扁平的泪滴状石块，厚厚的，撒得满地都是，我们的脚步都避不开它们。“难道它们是……”

“没错，是手斧。现在对人类学家没有多大用处了，因为它们已经离开了最初的位置，也很难被准确断代。不过根据外形，它们很可能出自直立人之手。你看，说话间我们这就到了。”

这片地方就像是一座削入断崖的露台。在一块布满沉积物的平地上，一位穿着短裤和格子衬衣的中年肯尼亚男子正跪在一块泡沫垫上。他拿着一把锥子，似乎正刮着地上的什么东西。当我们走近时，他站起来略有些生硬地跟我们打招呼，而我这才看清他刚才在做什么，在垫子旁边是一些被仔仔细细凿过的浅坑，还有一些筛出的骨头碎片。我的向导指着他跟我介绍说这是卡莫亚·基谬（Kamoya Kimeu），一位德高望

重的化石专家。

“欢迎你！”他一边打招呼一边伸出一只满是泥土的手，“如你所见，这还只是个半成品。”他转过头指了指整个山崖断面。我倒吸了一口气。基谬看到后笑了，手中还挥舞着他的那把锥子：“多数发掘工作都是用这种工具一寸一寸进行的。自打我4年前发现第一块碎片算起，我已经挖掘出了很多，不过辛苦也是值得的。团队中多数成员现在都已经离开了，但我仍然会坚守，直到最后一块化石被发现。”

他另一只手里握着的是一根细长的棕色指骨。“直立人的，”他说道，“这属于我的某位祖先。他生活在150万年前，我们猜测他死时只有10到12岁。”



1988年，卡莫亚·基谬在肯尼亚北部发掘“图尔卡纳男孩”的场景。照片由卡特·施塔格拍摄

接着，在一段长到足以让我消化这些信息的沉默之后，他眨了眨眼睛：“其实也是你的祖先之一。”

从地上撬起这样一片远古人类的化石，可以告诉很多关于你自己的故事。最明显的一点可能就是提醒你，在你的体内也有一副类似的骨骼。同时，这也说明你的血统可以深挖到地质时期，因为你的身体有着史前人类的基础，并且死亡始终是生存最终不可避免的结果。也许有时

候这会让你陷入沉思，那就是在遥远的未来，会不会也有某个人将你的尸骸也用这种方式发掘出来。与此同时，这些结构由矿物质构成的远古骨骼和牙齿也在提醒着你，你的骨骼其实是精加工的泥土。

在漫长的历史中，牙齿之于哺乳动物就如人造工具之于人类。犬齿会刺入咬紧，臼齿用于切割磨碎，而门齿则用于咬断啃啮。不过骨骼也是维持生命的关键，它们保护着你的组织免遭冲击，给你的肌肉提供支点与杠杆，让你可以站立、行走、说话以及操控各种事物。它们还是钙和磷的储存库——这也是两种非常重要的元素，以一种被地质学家称作磷灰石的矿物形态构成了骨骼与牙齿中的大多数质量。

在嵌于花岗岩时，磷灰石通常是微小的蓝色晶体，而在水下沉积物中，它们则是有光泽的黑色矿石。不过在龟壳、象牙、鹿茸或是你的身体中，大多数生物性的磷灰石都是象牙白色。每一片微晶就像是原子堆积起来的珠子，主要由钙原子和磷原子再掺入氧原子构成。晶格结构中的不规则性也给其他原子“游客”提供了空间，故而磷灰石是已知矿物质中最多变的几种之一。它的名字来自于一个希腊单词，本义是“欺骗”，而它的多变性也使得它可以在人体内扮演多个角色。

钙原子与磷原子都可以和很多元素进行结合，可以是两者都有，也可以是两者之一。蛋壳、贝壳以及珊瑚礁中呈白垩状的碳酸盐胶结物，由钙、碳、氧三种元素构成，而单独的钙离子可以帮助协调你的心跳，并有助于凝血功能。磷元素使你的基因骨架变强，并可以帮助你储存或释放食物中的能量。不过更确切地说，是钙与磷合作产生的磷灰石才更强有力地支撑了你的身体。

图尔卡纳男孩指骨中的原子当然也不是这个男孩自己制造的。和你的原子一样，它们是在太阳系形成以前的某颗恒星上形成。几十亿年之后，蒲草和灌木将它们从土壤中提取了出来并传递到食物链中；终于，就在图尔卡纳湖岸边再次和它们土地中的伙伴重聚前不久，它们结晶到了这个男孩的手指之中。如今从科学的目的出发，我们很珍视这些古老骨化石的价值，就像这位已故的小主人很珍视它们一样，只不过他更多是从个人角度看待。

这便是钙与磷的传奇，将我们与山石风化和森林生长联系起来。从

本质上讲，它们也让你和我，以及卡莫亚·基谬与这位不幸的史前男孩之间都有了关联，尽管后者的骨骼已重新回到了它们起源的非洲大地。

你的骨头是活的

和你的指纹一样，你骨骼的原子构造也是独一无二的。尽管它们看上去有点像毫无生气的棍子或石头，但事实远非如此。你的骨骼是活着的，它们会根据你的环境和生活习惯做出动态反应。

你是否曾经骨折过？折断时的巨大痛苦正说明在骨骼上嵌有敏感的神经。

骨折最终痊愈了吗？如果你的骨骼只是没有生命的石头，那么任何损伤都是永久的。

那么，是不是日常生活中的扭曲、冲击以及其他压力几乎都不会造成骨骼的明显损伤呢？如果你的骨骼只是像水泥似的简单构成，就跟骨瓷（一种由含硅矿物质与骨灰粉混合而成的瓷质材料）一样，那么它们会非常容易碎裂。很显然，这些躲在体内常年不见天日的硬骨头，远不是看上去那么简单。

在去除脂肪的骨骼干物质中，大约有2/3是石质的磷灰石，平均占成人体重的3%～5%，基本都隐藏在体内不能被看到。我们一般只会在受伤或是使用X射线时才会注意到骨骼，而且每每想起206根骨头排列的完整骷髅时很难不让人联想死亡。与牙齿不同，你通常不会看到自己的骨骼暴露在外，除非遭遇很严重的不幸。尽管如此，我们还是可以变换一下想象力的焦距，近距离地看看这种支撑你肉体的不寻常物质。

食指的横截面是个不错的起点。当你使劲用另一根手指压住这根指头时，可以透过表层的皮肤感觉到这根骨头。如果将它取出来——再说一遍，这只是想象一下——放在手心，那么表面上看，它就像是一根奶白色的树枝，而非图尔卡纳化石那样的棕色。

在指骨化石中，矿物质原子已经用它们自己的方式进入了骨头中，从而改变了原有的颜色和密度。直到近期，古人类学家都认为这种替换是严格的化学过程，但最新的研究表明，细菌也能完成其中很多工作。

2010年《古代》（Palaios）杂志上刊登了一项研究，其中有一个实验是牛骨样品在河沙中的置换过程，一部分样品中添加了抗生素而其他则是空白样。三个月后，在含有细菌的河沙中，牛骨已经被大量矿化，这有别于无菌环境中的样品。结合对图尔卡纳化石的精确分析数据，这一有关化石矿化过程的最新解释，可以揭开更多图尔卡纳湖岸在100多万年前发生的故事。

尽管我们还不能肯定男孩死亡的原因，但他的骨骼和牙齿还是可以反映他的精确年龄，同时也可以判断他的性别与身高。四肢前端尚未完全发育的关节以及没有完全长齐的牙齿，说明他的年龄在7到15岁之间。较宽的颅骨说明他是男性，而根据他的臂骨与腿骨可以测算其身高大约是5英尺4英寸（1.62米）。尽管作为小男孩来讲算是相当高了，不过他还不能算是人类。直立人骨盆的特征说明，当时女性的产道还太小，不能容纳现代人类婴儿那么大的头颅。

骨骼没有被咬过的痕迹，说明图尔卡纳的这个男孩并没有被捕食者当作晚餐。一根破碎的肩胛骨说明他被一个或多个大型动物踩踏过——根据浅水中存在的鱼骨及其他证据推测，肇事者可能是河马。杂乱无章的现场暗示，他的身体是面朝下方栽入水中的，细腻的淤泥将其覆盖，尸体随后开始腐烂。细菌将骨骼中的胶原蛋白、细胞和血液消化殆尽，并将矿物质遗留其中，填补了有机物曾经占据的空间。红血球中的铁原子与很多种蛋白质中的硫原子相结合，将一些代谢细菌埋入了黄铁矿小颗粒的坟墓之中。骨骼毛细管以及潮湿沉积物中的其他铁原子则给化石抹上了铁锈色。

在近千年的时间里，曾经多孔的骨骼变得像是致密的棕色陶瓷，如果你跟我一样，也敢到附近找一片河马的脊椎化石，你真的可以“听到”这男孩的骨骼到底发生了多大变化。当我用河马化石敲击一块石头时，它会发出一阵美妙的声音。而新鲜的骨头有很多微孔，其中充满了有机黏液，敲击声会非常沉闷。

磷灰石从周围环境中置换原子的自然倾向，也让你自己的身体可以自我编辑。你鲜活的骨骼会含有一些天然的添加剂，轻微弱化矿物基质，而骨骼中的干物质中有7%都是会溶于酸的碳酸根离子，这样必要时

你的骨骼可以很容易修复或重新定型。同时，这也让骨骼成了一座便携式的采石场，当食物缺乏时，身体就可以从中调取钙和磷。

磷灰石在牙齿外层坚硬的牙釉质中形成较大晶体，相比于骨骼，它能够更好地抵御磨损和化学腐蚀。形成这一结果有好几个原因：牙釉质含有的碳酸盐比骨骼中更少，故而不容易被口腔中的酸性物质溶解；氟原子填补到晶体结构的裂缝中，提高刚性的同时也使其更为稳定。饮用水和牙膏中添加的氟原子可以使之进一步增强，并取代那些被腐蚀性酸带走的原子。唾液中一种叫作釉护膜的蛋白质会在牙齿表面附着薄薄的一层，保护其免遭化学物质的腐蚀，同时也能防止膳食中的钙和磷与牙齿结合而像洞穴中的钟乳石那样生长。精致的蛋白质保护层也包裹了每一颗磷灰石晶体，避免发生断裂。

这些都是非常好的特点，毕竟你一生之中只能拥有这一套恒牙。一直坚守岗位的牙釉质是你身体中最年长的部分之一，早在你的乳牙“临时工”退休之前很久，它们就开始在你的双颚内部生长了，甚至有一些原子当你还在子宫里时就开始沉积了。

另一方面，你的骨骼还需要执行其他很多任务，它们比你年轻得多，是因为骨骼各部分平均每年会替换掉其1/10的细胞。相对较软的骨基质，可以帮助你的身体对你的生活状态做出反应，重新排布原子。为了能满足日常需求，每一根骨头内部结构的复杂性都不亚于一栋摩天大楼。

这个类比非常合理，因为高层建筑可能遭遇的风险，正是骨骼也同样面临的。一栋完全由混凝土构造的高楼非常脆，不可能矗立太久。解决这一问题的方法是将混凝土浇筑在钢筋骨架外面，这样建筑的强度就可以抵御大风或地震了。而在骨骼中的磷灰石内部，也包裹着由胶原蛋白构成的“钢筋”——一种强度巨大且富有弹性的蛋白质，给你的跟腱和韧带安上弹簧的也是它们。磷灰石与胶原蛋白结合之后，将你的骨骼打造成兼具强度与韧性的构架，从而让你可以拉拽、搬动或击打各种东西而不会骨折。

更仔细观察你的指骨表面，你会发现它其实是蜂窝状的，分布着微型的空腔、通道和管道，而且密质骨中看上去是固体的物质上其实却很

潮湿，事实上，骨骼总重的20%到30%都是水。作为一种不可压缩的液体，广泛分布的水可能也是增强骨骼抗震性能的因素。

在你出生的时候，你的骨骼多数是由软骨组成而非磷灰石。这其实非常合理，因为软骨主要由蛋白质和水构成，比成熟的骨骼更有弹性，这样在你通过产道的时候就会更容易。人体的骨骼完全硬化需要到20岁左右才能完成。

软骨到硬骨的转化过程，需要动用数百万的细胞发挥它们的“采石术”，从食物中提取钙原子和磷原子，并将它们填充到蛋白纤维的空间里。哺乳期的婴儿获取这些原料的来源是母乳，其中有一些含磷的酪蛋白与磷酸钙形成的细小悬浮颗粒。这些颗粒的直径正好可以通过人们所熟知的丁达尔散射现象散射蓝光，因此乳汁在撇去其中的脂肪后会发出微弱的蓝光。不断生长的骨骼中，蛋白纤维会继续给新的磷灰石结晶提供沉积位置，而它们生长的方向也映射出骨骼一些特殊部位最常遇到的压力。

晶格逐渐固化之时，勤劳工作的骨骼细胞发现它们被困住了。但这并非像监禁那样，但确实是重要的转变，它们从此有了“监护人”——每一个细胞继续生活在独立的小室中，跟家一样温馨。骨骼上的管道让血管离得足够近，从而向骨骼提供食物、水和其他“建筑材料”，并带走废弃物；腔室之间的通道中分布着神经元，可以帮助骨骼细胞与身体其他部位或相互之间传递信息。

一旦你的手指惹上结构性麻烦，你的骨骼细胞都会做好反应的准备。如果发生骨折，它们会用一种易于移动的磷灰石帮助伤口愈合，也就是所谓的“编织骨”，随后会被强度更高的磷灰石与胶原蛋白组成的“胶合板”所替代。扭伤和脱臼会使嵌入骨骼的细胞发生扭曲，并告诉它们需要加强对环境的反应，以防再出现类似的压力。而当哺乳期的母亲需要满足母乳对钙磷的更多需求时，她的骨细胞还会从骨骼中提取这些元素，以补充食物中的不足。

骨骼的活性特征使得每个人的骨头都是独一无二的，你的生活习惯也会在骨骼构造中得到反映。例如跑步者在运动时，脚底板与跑道之间会产生冲击，而肌肉也会拉伸足骨、胫骨和腿骨，因此他们腿部的磷灰

石与胶原蛋白排列也会变得更为特殊，以抵抗这些外力的作用。骨骼海绵状的内部结构也可以重新构建，用于抵抗跑步带来的外力冲击，同时长骨骨壁也会增厚，从而提供更高的强度。由于蹲在冲浪板上产生的压力，冲浪运动员常常会在膝盖以下的胫骨位置形成“冲浪瘤”。网球运动员握拍的那只手臂，臂骨也会比另一只胳膊更强健，此外一项发表于《美国运动医学杂志》的研究称，军队新兵在服役前经常打篮球的，不太容易在基础训练期间出现胫骨骨折。这个过程反过来也是成立的，例如宇航员在太空中处于失重状态，骨骼强度就会下降。

其实这看上去还蛮奇怪的，因为构成活性骨骼的成分跟石头并无太大差别。你当然不会将单纯一副骨架就称之为人，但你也绝不会认为那只是一堆人形的矿物质。可以说，它模糊了生命与非生命之间的界限。

你的骨头来自岩石

20世纪初，当阿尔多·李奥帕德还只是一名年轻的丛林探险家时，他在亚利桑那州东部的山区里经历了一场顿悟。他所著的《沙郡年记》于1949年出版，尽管当时他已离世，但这本书还是激励了一代又一代的生态保护者和环境学家。书中，李奥帕德讲述了一个故事，发生在他与同伴射杀了一群正在猎鹿的狼之后：

我们及时追上那匹老狼，看到凶狠的绿火在它眼中慢慢熄灭。看着它的双眼，我突然明白了很多事——在过去只有它和大山才明白的事。我那时还太年轻气盛，心里全是扣扳机的冲动。我曾经觉得，狼少就意味着鹿多，没有狼就是猎人的天堂。然而当我看着那两团绿火熄灭时，我感受到，不管是狼还是大山，都不会同意这样的观点。

绿光的故事是李奥帕德的书中最广为人知的文章之一，而它的寓意也让《沙郡年记》中提出的土地伦理广泛传播。这个故事也揭示了狼群与大山之间的原子关系，而我们人类和这个星球，以及其他各种生物之间也存在着同样联系。这层关系就是光合作用的“绿火”。

数亿年来，一代又一代的植物将它们的生命绿火向外传递。它们同时也通过食物链向外传播能量和原子，将土壤和植物、鹿群以及狼群联系了起来。从原子角度来说，老狼眼中的生命之火，来自它与它生活的这片土地间的元素关系，也来自它与养育它的猎物的那些植物的关系。对你而言也一样，严格从原子角度上说，你之所以能够存在也是因为这些植物。往回追溯你体内原子的踪迹，你能发现它们大部分都来自土壤。

你每一次呼吸从空气中抽取的氧气，都是松树、棕榈树以及矮牵牛这些植物的产品，当然也离不开海洋中浮游生物的帮助。构成你体重近1/4的碳，几乎都是玉米、小麦或它们的亲戚们从空气中获取的。就算你从不吃一口面包或沙拉，你也仍然会通过消费动物食品，吃下它们先前吃下的植物原子。你体内的大多数水分都曾在叶子或茎中待过一段时

间，或是由你体内的呼吸细胞利用植物产生的氧气代谢而来。而在人工合成化肥被发明以前，你祖先的蛋白质和基因，其中的氮原子也主要由植物根瘤菌固定而来。

你体内的哪些原子未曾在植物体内待过？将你体内的水分除去，你会变成一具木乃伊；如果再除去碳和氮，你就成了一捧骨灰。但即便是这些骨灰，也和植物世界有关。你血液中的铁和盐是植物根部从土壤中吸取的，你骨骼中的钙和磷也是如此。

不管你觉得自己是如何自给自足的，你其实还是像孩子依赖父母那样，需要依赖植物的生命绿火。我们也许时常会觉得，树根无非就是树木用来抵御狂风的缆绳，但事实上它们和你的骨骼一样，远比看上去更复杂。森林在地下的缠结，无论是延伸性还是繁忙程度都不亚于树冠，而且它们是连接你和地球岩石骨骼的桥梁。

下一次当你有机会可以仔细看看山坡时，多关注一下上面的植被吧。如果你来到亚利桑那州阿尔多·李奥帕德遇到狼的那个地方，那么你会看到瑟瑟的白杨与芬芳的松树遮盖了此地大部分地质地貌，而色彩柔和的地衣像油漆一样，洒满峭壁与岩石。从远处看，这是一片静谧的场景，但如果让你站到那些植物生长的位置上，你恐怕就会吓得屏住呼吸了。

这片森林正在将整片地貌撕裂。

注意这些岩石表面的裂纹。树木、灌木和地衣并不像花园中的花儿一样，仅仅是覆盖于其上——它们正在将岩石凿开，从中吸取养分，并将它们撕成碎片。

这便是石块变成尘土的过程，第一步就是将矿物质原子释放出来传递给生命王国。风雨、河流还有冰雪也会做同样的工作，但直到4亿年前第一片大型森林出现之后，植物对地壳的雕琢才达到了可观的规模。

在亚利桑那州以东数千英里的缅因州沿海地区，类似的技术曾长期用于花岗岩工业。19世纪到20世纪，在一群新英格兰采石匠的努力下，经过新英格兰地区一个寒冷的冬天，巨石从支撑它们的基石上自动掉

落，随后被用于建造布鲁克林大桥和纽约股票交易所。

尽管用于路牙或台面的花岗石看上去异常坚固，但构成它们的那些多彩颗粒却并没有很强力地融合在一起，只不过是挤压在一起罢了，在水分的作用下它们的接触就会松动。花岗岩就像是一块石化的麦片粥，其中成分主要有玻璃质的石英颗粒、闪闪发光的云母片、粉红或白色的长石，以及各种黑色矿石。在合适的条件下，这一松散联盟远比你想象的更容易瓦解。

在缅因州的采石场，工人将楔子砸入岩石的天然裂缝中，将水倒入任由其结冰。因为冰会膨胀撑开缺口，楔子便可以钉得更深。如此循环下去，直到整个大块石头松动。当植物与水采用类似方式组队时，便有了自然界的缅因州采石场。

在温暖的季节里，植物须根的根尖伸入石块缝隙中将它们楔开，整个摸索过程几乎像手指一般精确。随着白天或干燥季节的蒸发，根部直径会收缩1/3，这样根尖就可以更深地探入裂缝，直到潮湿期来临时再次膨胀。根部随着树龄增长而变粗，最终也能撑碎卵石；冬天的冰膨胀时让裂缝撑得更大；此外，石块的外边缘与基岩具有热胀冷缩效应，让石块的弱化变得更加彻底。

花岗岩的分解也会在原子尺度上进行。雨雪中通常含有较弱的碳酸，可以瓦解矿石颗粒的原子结构，将它们部分溶解并带走钙、磷以及其他元素。含铁量高的颗粒会生锈，并给岩石染上色彩——研究认为地球上有大量氧元素都被这种方式固定住了。有时候，你甚至可以用手捏碎高度风化的花岗岩，因为其中的长石都被粉碎成了黏土，剩下的石英颗粒就跟松动的牙齿一般，在稀烂的基质中失去了支撑。



位于西非喀麦隆高度风化的花岗岩，正在被粉碎成沙砾、淤泥和黏土。照片上的这双手，其细胞所需要的铁、钙、钠、钾等原子也来自类似的岩石。照片由 Curt Stager 拍摄

这与你的骨架又有什么关系？

这些岩石的风化，最终为你的骨骼提供了钙和磷。你体内的大多数矿物质原子都从地壳而来，而且很可能是靠植物的手——或者说根来实现这一过程的。

石头、植物与人类之间的原子关系并不太容易被观察到，这种不可见性也掩盖了地球上生命之间一些最值得关注的内在关联。岩石风化后的尘埃相互混合，通常会成为动植物的灰分。李奥帕德笔下狼眼的绿火从原子的土壤中产生，你自己眼中的闪烁也不例外。

隐藏在地下的原子交易市场

如果你乐意，这一次不妨想象一下你来到另一座位于新罕布什尔州的山脉，跪在松树林中柔软而芬芳的地面上，徜徉在斑驳陆离的阳光之中。既然你正准备探索脚下的大地，那么请记住一点，土壤是活的，而不只是古老的沙子。它是矿物质与有机质构成的动态混合物，就跟你的骨骼差不多，同时它也是活着的，地质与生物圈在它的内部共同进化，个体与群体的界限正在变得模糊。

这片特殊的土壤是一层层墓地，而新的生命就孕育于其中。前一年的针叶与树枝混杂成一片软松的棕色地毯，越往深处则越紧密。细菌与真菌正在挨个儿分子、挨个儿原子地拆着这片地毯，于是当你向下挖到更古老的地层时，也能看到渐变的降解过程。

将一些松散的碎屑刮到旁边，你会揭开一片黑色焦油状的沉积层，这全是因循环作用被洗到下层的有机质，可以看作是一种浓缩的深林老汤。这里有各种微生物产生的废液，含碳化合物以及其他曾经存在于生物体的物质都聚集于此。在这层黑色物质与沙砾层之间，是多彩的带状混合区域，土壤在有机酸的漂白下形成的灰状白色石英，而更深层的颗粒则被铁锈给染了色。

跟你的骨骼一样，森林土壤将岩石元素与生命物质混在了一起。一小捧这样的土壤里，就可能包含数十亿个细菌，它们附着在脱落的叶片上，挤进颗粒之间的缝隙中，吃的是从上面流下来的养分，就像那些引起蛀牙的细菌在你牙齿上钻洞那样，掏空了矿物颗粒。根尖上的黏液和死细胞也成了这场盛宴的一部分，而原生动物则潜伏在沙土颗粒之中，以细菌为食。比丝线更为纤细的线虫在原生动物身后蠕动，却不料又被黄雀在后的螨虫与昆虫当作了美食。

在这个微型世界中，一颗来自野花或是云母片的原子，就如同是地下经济网络中的一枚硬币，在一些世界上最小型的生物间进行着交易。然而这张交易网络不过只是一个角落，它隶属于一张更大的交易网络，

后者不仅维持了土壤生态圈，也养育了你。连接着植物与地球的树根，也将植物跟一个发散性的真菌纤维网络连接了起来；而这一地下关系网中的物质流动和我们人类的交易模式非常相像，以致生态学家都开始用经济学术语来描述它了。所有的植物种类中，有3/4都依赖这个“植物—真菌交易市场”生存，并形成合作联盟帮助它们更好地利用和分享资源。土壤之下埋藏的这个网络被称之为“菌根”，这也是一个源于希腊语的术语。

2002年，一支由环境学家乔·布鲁姆（Joel　Blum）领衔的科研团队在《自然》杂志上发表了一项位于新罕布什尔州哈伯德布鲁克实验林的惊人发现。采用同位素示踪法对山区分水岭上土壤与食物链中的矿物原子进行跟踪，他们发现了一些奇怪的现象。土壤样品中大多数钙离子都来自长石颗粒，但森林树叶中的大多数钙离子却是提取自更为罕见的磷灰石颗粒，但土壤中磷灰石所含的钙只是土壤总钙量的1/10。然而更为奇怪的是，树木并非是自己去提取这些原子，而是依靠各类真菌去挖掘这些矿产。

你也许会在森林或草坪上注意到很多蘑菇，它们看上去很像是植物，但从很多方面讲，它们其实和你更像。它们并不会捕获阳光并产生氧气，而是吸收有机质并释放二氧化碳。不同于那些用于吸收阳光的树冠，蘑菇的菌伞不过只是临时的孢子发生器。真菌的主体部分被称作“菌丝体”，是一团埋于地下的丝状活体，依赖于土壤生存，一旦到了需要撒出孢子的时候，它就可以生长出数目不定的肉质菌伞。菌丝比棉花纤维更为纤细，但它们的延展性惊人，绵延数英里的菌丝也许只需要占据一小撮土壤。

2003年，森林病理学家布伦南·弗格森（Brennan Ferguson）和他的团队经过研究发现，在俄勒冈州东北部，松蕈属真菌的菌丝破纪录地在树林下方铺展超过了3.7平方英里（9.6平方千米）。“秋季，在森林的地面上很容易看到这种真菌生长出来的金黄色蘑菇簇，”研究人员在报道中进一步解释道，“考虑到它的真实尺寸和对森林的影响，这些蘑菇只不过是冰山一角。”

有时候，菌丝纤维会深入到树根内部并寄生于其中，但在这种情况

下，它们反过来是从菌根中抽取营养。一个树根上可以有很多不同的真菌，同时每根菌丝都可以跟几码以外的树木和野花分享它们的生命分子。有些时候，真菌与树根会运用化学信号征召对方加入网络的建设，就像是连接母亲与胎儿间的胎盘那样。这样的真菌联盟可以使树木吸收的磷元素增加两倍，而且有些真菌甚至可以杀死并消化土壤中的昆虫，再将它们的原子通过树根输送给邻近的树木。

哈伯德·布鲁克所研究的真菌“矿工”，会渗透到土壤深层寻找磷灰石颗粒。当它们发现了矿产之后，会利用消化性的化学物质及酶作为工具“开采”其中的钙和磷。不过这些石头吞噬者并不会简单地储存它们的战利品：它们利用任何自己不能消费的元素跟上方的植物进行交易。

通过对树叶进行分析，研究者发现云杉与冷杉针叶中所含的钙，95%都是由开采磷灰石的真菌“贩售”而来。枫树与蕨类植物的叶片中，也有接近2/3的钙元素来自于磷灰石，剩余部分都是从腐烂的茎叶中获取，说起来也是早些年生长季时被开采和交易的矿产。

那么植物需要回馈给真菌什么呢？基本都是糖。不同于真菌，植物的叶片中，储藏了大量由阳光、空气和水转变而来的富含能量的糖，当树根从菌根交易市场带回水和矿物质时，同时也将糖交换了出去。

这样的交易方式也让欺骗行为变得有机可乘，一些物种便混入市场中做起了没本钱的买卖。杓兰（Lady's slipper）那细小的种子并不会跟向日葵种子或橡树种子一样，为胚胎储备常见的淀粉大餐。它们全都依靠慷慨的真菌资助，直到胚芽成长到可以自给自足为止。通体象牙白的水晶兰（Indian Pipe）甚至都懒得去制备让你认为它是植物的叶绿素，它们接受真菌的施舍却不回赠任何东西。

为什么欺骗不会导致整个系统崩溃？很显然一些原子交易者可以区分这些白吃白喝的家伙并予以惩罚。

生态学家托比·吉尔斯（Toby Kiers）与他的团队曾在《科学》上发表成果证明了这一点：他们先在实验室中用培养皿让真菌分开生长，然后再将它们挂到三叶草上。由于不同真菌获得的磷元素总量不同，结果那些只能提供少量磷的真菌，从它们的植物伙伴那里所获得的糖分还不

到那些高磷真菌的1/10。不管怎么说，植物都会保持跟踪，并拒绝与骗子进行交易，尽管同一片树根上生长着很多种真菌。反过来说，树木提供的回报越少，从真菌那里获得的磷也就越少。

这种合作系统颇有些像最具有生产力的人类社会。规则的执行是双向的，并基于报酬而定，而双方都可以自由地跟多个对象进行交易，也可以随意更换交易伙伴。在文章的结束部分，作者总结道："这个案例清晰地展现了，在人类社会以外，类似于市场经济的合作模式是如何被确立下来的。"

类似的植物—真菌合作关系在更居家的环境中也会经常发生。你窗台上的花会和真菌共享土壤，而你菜园里的蔬菜甚至会利用一种真菌互联网互相交流。《公共科学图书馆期刊》近期的一篇报道，西红柿可以通过监听它们之间的真菌来掌握其他同类的健康状况。当有西红柿被病原体感染后，它们会向真菌网络中释放信号分子，附近的其他西红柿因此做出反应，这样就会有足够时间启动免疫系统，避免自己被感染。《生态学快报》在2013年刊登的一篇文章则提到，豆类植物也可以通过共享的真菌网络释放分子信号发出"警告"，让附近的植物做好准备，抵御即将到来的蚜虫的袭击。

如果没有这种地下的"采矿"及"商业"系统，只靠缓慢风化的石头吝啬地提供矿物质原子，大多数植物都将无法生存。同时由于世界上很大一部分蔬菜最终都成为了食物，所以这一钙磷交易市场最终也让你和其他人从中受益。

不过因为菌根系统是个双向交易市场，土壤与生物之间的原子流动也是双向的。因此，不仅是矿物质产生了生物组织——几十亿年来，生命也生产了一些独特的矿物质。

生命也能创造出矿物

罗伯特·哈森（Robert Hazen）是少数几个名字被用于矿石命名且目前还健在的科学家之一。在过去的40年中，他写下了很多文章与著作，话题从生命起源谈到晶体的生长与演化，此外他还有一项与此平行的职业生涯，作为交响乐小号手接受卡内基学院与乔治梅森大学的联合邀请。他在个人生活中兼顾着科学与艺术，同时也探索着生物圈与地质圈的内在联系，看起来他也应该接受生物圈与非生物圈的联合表彰。

2008年，国际矿物学协会核准了“哈森石”这个名称，代表一种最近在加州莫诺湖碱性水域中发现的石头。这种石头是微生物的杰作——细菌从盐卤中获取磷、盐和水，并将它们堆积成微型晶体。其中不可或缺的磷是从上游河流中被冲刷到了莫诺湖；随着水分甩下它们蒸发到了干燥的沙漠空气中，这些磷就在饥饿的细菌体内滞留了下来。

哈森提出了一种全新的概念解释地球与生命的关系，就像他在为《科学美国人》所写的文章那样：“如果你认为一切非生命世界是生命表演其进化大戏的舞台，那么可以再多想一想，其实演员一直都在改进着舞台。”与岩石在为骨骼与贝壳提供原子一样确定无疑的是，有机体释放出的原子也在创造着那些无生命星球上肯定没有的矿物质。哈森继续写道：“坚硬的矿物质不同于脆弱的有机质，它们可以刻下最有力也最长久的生命存在证据。”

哈森估算，数十亿年前，我们太阳系这些多石的内行星由星际尘埃凝聚而成时，大约有250种矿石。它们中有很多也存在于陨石中，例如橄榄石和锆石。随后，地壳的风化与部分熔融作用产生了一些新的元素结合体，原始岩浆中产生了一些火成岩，矿石种类也迅速增长。但更为戏剧般的变化大约发生在20亿年前，具有光合作用的生物遍布到了整个海洋。

作为海洋版的“绿火”，蓝藻向海水中释放了大量氧气，海床上曾经是黑色的含铁化合物因此而生锈。海洋中的氧气又逸散到了空气中，于

是陆地上的岩石与沉积物也生了锈。哈森和同事们估测，这次大氧化事件共产生了超过2500种新矿石，要不然它们都不会大量存在。这其中有赭石和铁矿石、生石膏和熟石膏，以及200多种不同的铀氧化物。当构造板块相撞并陷入地幔以下时，它们会携带大量海洋生物的残体，在高温高压下融化、溶解或蒸发。比方说碳原子，它们可以从空气进到树中，随后又在菌根体系的蘑菇中再次出现，而以钻石形式重新冲出地壳的海洋碳原子也一样——曾经它们也是活着的，就和现在把它们戴到手指上的人类一样。

随着水生生物进化出了防御性的硬质部位，生物性矿石也开始在海洋中沉积。微生物产生的磷灰石颗粒在海底淤泥上凝结，而早期海洋巨兽富含磷灰石的口器和骨骼，其进化过程也可以帮助解释，为什么如今你的牙齿和骨骼会含有如此多的磷酸钙。不过最壮观的还是珊瑚与贝壳生物出现之后所产成的巨量生物沉积质——在过去的5亿年中，一代又一代的珊瑚虫、贝类以及浮游生物在海床上堆积着石灰质碳酸盐与霰石，其数量之巨可以从太空中看到它们。喜马拉雅山脉、阿尔卑斯山脉和阿巴拉契亚山脉上都布满了古代的海底石灰石，英国的多佛白崖则是由贝类生物的遗骸形成的，而澳大利亚沿岸的大堡礁更是超过了1600英里（2575千米）。

海洋中这些由生物所产生的矿石也固定住了大量温室气体——二氧化碳，通过弱化温室效应，使得古生代的气候变冷。在古生代晚期，森林从空气中吸取了更多的碳，并以煤炭的形式将数千亿吨的碳雪藏到了地下，而这种可以燃烧的石头如今又被我们送回了空气之中。



这只鹿的头骨，其中的钙原子是从它吃过的植物中来，植物又是从土壤中获取了它们，而土壤又源自纽约州谢齐附近的石灰质基岩，这些岩石则是大约4.5亿年前从一片珊瑚礁群落沉积而来。在地下埋了多年之后，石头上远古的蜗牛遗体还清晰可见，如今它们壳中的钙质通过当地的植物又送到了鹿的骨骼与牙齿之中

产生于空气与岩石之间的植物绿火，十倍以上地加速了地貌风化。2008年，地质学家菲利普·阿伦（Philip Allen）在《自然》发表了一篇文章，描述了陆地风化的惊人变化。每年都有超过200亿吨的岩石碎片被冲入海洋，此外还有几乎等量的矿物质溶于其中。对地貌如此大规模的雕琢，也促使地壳自身产生更大规模的运动。近期《地球系统动力学》刊登的一篇文章中，有德国科学家认为，树根与真菌正在将大陆板块磨得更碎，地壳的封闭重量与隔绝性都在不断下降，作为反应，地球的熔融地幔也会更加强力地爆发。如果这一假说正确的话，那么陆地将会漂浮、碰撞、地震，这都是因为上面载着树木和蘑菇。

鉴于生命具有改变环境的倾向，我们应该不会对我们自己做的事情感到过于吃惊了。很多人都在关注我们对世界造成的影响，认为我们破坏性的行为正在威胁着生态平衡。这种关注固然是合理的，但有些时候，不平衡也是地球上存在生命的正常迹象。

想一想森林制造的大量氧气，植物与真菌对地貌的快速风化，以及巨型珊瑚礁的生长，这些都深刻地改变了地球。植物从太阳中获取能量，将水分子撕开，从地下吸取流体和矿物质，并支撑起一个令人难以置信的多样化生物圈。如今，我们正在利用大脑、机器还有矿物质构成的各种建筑物，保持传统，跟随我们的远祖物种实现着类似的丰功伟绩。不过这也带来一个老生常谈的问题，那就是我们人类是不是真的跟自然界的其他物种不一样？我们为了生产化肥而商业化开采磷矿，与哈伯德·布鲁克所描述的真菌开采磷灰石，究竟有多大区别？既然植物可以改变这颗行星的地表，开展自然资源贸易，改变大气中的化学构成，那为什么我们就不行？

单纯从原子角度看，也许可以认为这没什么不同。跟所有生物一样，我们利用地球上的原子构建并维持着我们的身体；并且我们也像其他所有生物一样，在对结构与外形进行或多或少的修饰之后，又最终将它们还给了地球——最大的区别或许是，我们具有理解自己行为的能力。因此，这就给我们的行为增加了一道伦理的评判尺度，尽管很多行为我们认为都是基于人类特有的伦理观，但对于人类以外的生物也还是具有实际意义。

作为一种社会意识，我们的祖先学会了依赖合作而生存，但是在地下网络中，尽管植物和真菌都不具有意识，但也还是通过分享资源获得繁荣。合理的行为准则有利于稳定我们的社会，但是在植物—真菌市场中，长期以来也依赖公平交易法则得以维持。不管你如何笃定人类是如何独一无二，有件事都是确定的——我们的原子性质让我们和其他物种一样，都是地球生态系统的一部分。至于我们行为的伦理含义，阿尔多·李奥帕德对这个问题给了一些明智的建议：“如果一件事是为了保持生物圈的完整性、稳定性以及美观性，那么它就是正确的，反之它就是错误的。”

当我们正在以日渐增长的规模开采资源，同时也在让这日益拥挤的世界淹没于我们的废弃物时，理解生命的元素循环，就变得和我们原始人祖先直立姿势的进化过程同样重要。因此，这是一件重要而又快乐的使命——尽可能从原子的角度看懂自己。



农业学家手中握着一把钥匙，可以打开富人的钱柜和穷人的存钱盒；自然法则迫使我们每个人每天都需要考虑摄入几盎司的碳和氮，任何政治事件都不能对其影响分毫。

——尤斯图斯·冯·李比希

（Justus von Liebig，德国化学家，有机化学创立者）

我们或许可以用核能替代煤炭，用塑料替代木材……但对于磷来说，却没有什么替代品。

——艾萨克·阿西莫夫

（Isaac Asimov，美国著名科幻小说家，曾提出“机器人三定律”）

俄勒冈州的上克拉马斯湖（Upper Klamath Lake）是一个未开发的生态系统，这里生产着一种神奇的物质，能够治疗你的疾病，并供养这个世界——至少根据“细胞科技”公司的说法是这样的，他们是最早几家从绿色湖水中滤出绿泥的公司之一。他们给自己的神奇产品起名为“超级蓝绿藻”（Super Blue Green Algae或SBGA），声称它可以增加活力，给身体排毒，增加营养，并促进儿童生长发育。

后来，这家高利润的公司因涉嫌多项违法行为而被起诉并关闭店面，所涉罪名有虚假广告宣传，以及一宗由受害者家属上诉的过失致人死亡案件——一位名为梅丽莎·布莱克的SBGA使用者因器官衰竭于2003年死亡。今天，如果你自己还想试试上克拉马斯湖的神奇产品，还可以从一些公司订货，他们依旧在湖边开采或是从全球数千个家庭作坊收购蓝绿藻。不过你最好还是三思而后行，先参考一些科学上可靠的报告，报告中警告这些从湖里收集的野生浮游生物可能含有病原体、神经毒素、肝脏毒素以及其他感染物。

为什么要吃绿泥？先把这个最显而易见的问题放到一边——另一个最让人好奇的疑问是：为什么上克拉马斯湖的湖水会如此之绿？很多公司的促销资料都声称，由于该湖泊没有被人类破坏，同时又含有大量肥沃的火山沉积物，微生物在此自由而茁壮地生长。不过这样一个地方的生物，其原子特征的深层意义却可以得出其他不那么动人的解释。

上克拉马斯湖变绿的过程很值得从原子层面上进行探究，这不仅是因为其生态过程以及背后充满人情味的故事很迷人，更是因为这关系到我们全球的增长极限。这个故事的主角是磷，由于它在有氧气存在的时候具有发光的趋势，因此古希腊用它给启明星命名，用磷代表光明使者。与我们之间的复杂生态关系，使这种元素成了一个导火索，它引发了一场激烈的辩论——地球到底可以承受多少人口，我们如何提高粮食产量，甚至我们如何洗衣服。

蓝藻生长的木桶效应

19世纪期间，德国化学家尤斯图斯·冯·李比希提出农业革命的概念，并淡化了生命世界与非生命世界之间的界限。

1815年，由于印度尼西亚坦博拉火山爆发，北半球被火山灰形成的阴云笼罩，从而使欧洲遭遇了一场“无夏之年”，大量粮食作物绝收，当时年轻的李比希亲眼目睹了这场大饥荒。后来，当他当上吉森大学的教授时，便致力于开发家畜粪便以外的化肥生产方法。不过，虽说李比希还发明了“李比希肉精”，并且如今这种装在方盒中的肉类提取物行销全球，但他最容易被人记起的还是“最小定律”，意思是说：植物生长的限定因素，取决于供应量最短缺的营养物质。

忽略其精确性，这一概念的部分主张就是李比希经常打的比方——木桶效应。他将耕地产出能力比作木桶盛水的容量，木桶由一根根不同长度的木板垂直拼成，那么它在溢出之前所能装的水量，取决于最短的那根木板，而粮食增长的极限就是最紧缺的资源被消耗完的时候。例如，在坦博拉火山喷发的余威之中，阳光成了欧洲农场的限制因素；同样，过去的农业受制于季度性泛滥以及家畜的排泄速度，氮元素往往是局限因素，而工业化固氮技术则加长了这一块短板。

李比希开创性的研究成果后来也让弗里茨·哈伯开发氮肥有了理论基础，而他的最小定律也启发了今天的农民，告诉他们为什么合适配比的氮磷混合物对于维持粮食生长是必要的。这条定律有助于解释上克拉马斯湖的变绿过程、水下沉积物的恶臭，以及席卷全世界海岸线的有毒赤潮。

尽管李比希的工作着眼于农业中的氮元素，但后来的研究发现，对于水生生物的增殖而言，磷元素扮演着更为重要的角色。1973年，生态学家大卫·辛德勒（David Schindler）和同事们来到奥兰多南部的一座偏远研究站，在实验湖区（ELA）的226号湖泊中央，拉起了一张塑料阻隔帘。阻隔帘的一边，他们加入了碳氮元素均很丰富的肥料，而在另一

边，他们在这种肥料之外又添加了磷元素。几天后，他们的实验结果就算在飞机上都能看得清清楚楚：一边湖水还是蓝色，而另一边已经变成满是浮渣的绿色，这非常有力地证明了李比希定律。

在这个案例中，磷元素就是抑制浮游生物生长的那块“营养短板”。在湖泊之中，磷元素通常都很难获取，因为大多数磷都被锁定在岩石或土壤之中，或是被深埋在难以企及的湖床之下，这种稀缺性也和它在宇宙中总体相对较小的丰度有关。在我们的太阳系中，磷原子的数量大概只有氢原子的三千万分之一，相对于其他主要的生命元素，丰度也只有几百分之一。如今，支撑起水下生物链的浮游藻类从它们漂浮的水体中获取磷元素，如果水中溶解的磷含量降低时，浮游生物也会减少。

对于你我而言，野外湖泊中清澈湛蓝的湖水看上去会显得更正常也更诱人。但从浮游生物的角度看，这还是一片等待开发的处女地。当混合物中没有磷的时候，过剩的氮和碳对于226号试验湖中的藻类没有任何作用，就像燃料不充足的壁炉起不了什么作用一样，而加入关键组分，就像是在阴燃的煤炭上泼了些打火机油——从生物学的角度而言。当这种生命必要元素突然变得绰绰有余时，微生物的数量便呈现了爆发式增长，就跟农业现代化之后的人口剧增一样。

辛德勒针对磷的研究在禁用含磷洗涤剂过程中扮演了主要角色，在这之前，家庭与企业向河流湖泊倾倒的这些洗涤剂，引发了令人讨厌的藻类爆发，就和226号试验湖里发生的事情一样。如今，磷元素已明确被列为施肥草坪、农田以及污水源中的问题元素，以帮助保护水质。

从另一个意义上说，在226号试验湖进行的研究还与上克拉马斯湖相关。辛德勒发现，向湖泊中添加磷元素不仅会刺激浮游生物生长，而且某些特定种类会生长得更快。在试验湖中，磷元素让那些可以自行固氮的物种有了优势，而蓝藻作为一类特别令人讨厌的固氮生物，通常会霸占整个湖水，并获取更多磷元素。

蓝藻很像藻类，但它们却隶属于完全不同的生物类别，与真正藻类之间的差异不亚于杜鹃鸟跟杜鹃花之间的区别。生物学家曾经管它们叫蓝绿藻，直到进一步研究了它们的细胞之后才将其划分到了细菌王国中。这样的区分很重要，而这不仅仅是因为给健康食品打上“细菌”的标

签会让销售变得困难。一些蓝藻细菌会产生神经毒素或肝脏毒素，使它们生活的湖水不能安全地用作饮用水或洗漱用水。在辛德勒测定的湖中，其中有一属蓝藻是束丝藻属（Aphanizomenon），巧合的是，这也正是从上克拉马斯湖中开采的主要成分。

其实上克拉马斯湖和所谓的“原始”相距甚远，这里简直就是人工富营养化的样板。美国地质调查局的科学家曾经从湖底采集了沉积岩芯，并从中读出了这种蓝绿色财富背后的故事，而他们公布出的分析结果远非广告中所宣称的上克拉马斯湖“一尘不染”或是“完美的自然生态系统”。可以代表湖泊几个世纪历史的沉积物，证明束丝藻的爆发反映了该流域内的人类活动。20世纪早期，随着人们在湖岸边定居，放牧、开渠、排干沼泽等行为向湖泊中排入养分，蓝藻的营养物来源从此不被限制。抛开商业开发，这一湖泊的蓝藻爆发更应该被称为严重的污染问题，而不是什么令人叹为观止的产出。

随着束丝藻的生长并逐渐加厚，死去的细胞会从阳光普照的湖面上降落到湖床上，被微生物分解时会消耗水中的大量氧气。接着，较低的含氧量会让湖床上的铁原子从先前铁锈的束缚中释放出来。由于覆盖于表面的铁氧化物溶解，从浮游生物腐烂而来并沉寂于淤泥中的磷原子也得以扩散到了水体中，并刺激更多蓝藻生长。更麻烦的是，微胞藻（Microcytis）这种臭名昭著的有毒蓝藻，有时候也会跟束丝藻一起享受上克拉马斯湖的这顿磷的盛宴，并产生毒素。上文提到的梅丽莎·布莱克之死，据说其死因就是自然采集的SBGA产品中含有微胞藻毒素，质疑者同时还认为这些蓝藻毒素可以解释诸如刺痛感、肠道疾病及呕吐等症状，而这些却被消费者解释成促进活力与清洗肠胃的正常反应。最近，德国毒理学家亚历山大·霍伊斯纳（Alexandra Heussner）和同事经过测定后发现，上克拉马斯湖的蓝绿藻产品所含的微胞藻毒素，已经超过建议的儿童暴露水平上限；他们也因此警告消费者，称该产品具有“严重的急性与慢性不良健康反应”风险。





正在发生的富营养化。左图：奥兰多实验湖区的226号湖泊，因为磷元素刺激而生长的浮游生物在湖水远端显现出颜色变化。照片由大卫·辛德勒拍摄。右图：2005年8月，从太空观看到的上克拉马斯湖蓝藻旋涡。感谢NASA提供的陆地卫星照片

人为的富营养化对于上克拉马斯湖的蓝藻来说是好事，对湖里的其他居民而言就不是这样了。在这片区域中，有两种属于濒危物种的鱼类如今已处于呼吸困难的境地。像这片湖泊一样的悲剧也在全球范围内上演着，因为人口日益增长，让通常从岩石与沉积物流失的磷增长了四倍。在墨西哥湾，由于密西西比河沿途的中西部农场及城市向河中倾倒了大量磷原子，并全部流入了这片日益富营养化水域，其沿岸鱼虾遭到了空前威胁，巨大的“死亡区域”如今已是司空见惯。波罗的海地区也遭遇了类似问题，丹麦与瑞典的报纸经常会警告海滨游客们离开沙滩，因为有毒的海水让本地的贝壳窒息，并将海岸变成了一座黑色并散发着恶臭的墓地。

磷元素的富集带来了营养成分，当然也可以被看作是有机体的福音，如果这个过程在花园中发生，我们通常会喜欢这样的结果。“富营养化”（Eutrophication）这个术语源于希腊语，本意只是单纯指代营养充足的生态系统，当科学家说到某个湖泊或某片海域是富营养化时，从技术上讲也只不过是个中性词。但由于将磷排放到水体中造成人为的富营

养化，在大多数人看来都不是什么好事，更像是吃得太撑得了病。

然而我们并不是第一个用这种方法给地球施肥的物种，地球本身也会分配营养物质，在有关李比希定律的案例中，有一个更为值得关注的事件，数千年来从遥远地带向外输出另一种营养物质多达数百万吨。在这个案例中，赋予生命的原子并没有通过被污染的河流旅行，而是随着湍流的空气之河漂流。

从撒哈拉到亚马孙的原子迁徙

1832年1月16日，皇家海军小猎犬号（贝格尔号）停泊在了位于非洲西北炎热海岸之外的佛得角群岛。站在这艘不列颠双桅帆船甲板上的是年轻的查理·达尔文，此时他刚刚踏上征程几周的时间，而这段旅途后来促成了他的著作《物种起源》。在他的日记中，达尔文记录了一件事：炎热的赤道空气中，总是混有一些奇怪的颗粒。颗粒中是一种藻类的玻璃质外壳，如今的科学家们都知道这来自于“硅藻”，而当时的自然学家则称之为“纤毛虫”：

空气总是朦朦胧胧，而这是由一种不能被识别的细沙从天而降所致，并且会轻微地损坏天文仪器。在我们停泊到普拉亚港的前一天早晨，我收集了一小包这种棕色细沙，而它们是由桅杆顶上的风信旗布从风中过滤而来。莱伊尔先生也给了我四包这样的细沙，它们掉落在群岛北边数百英里外的一条船上。艾伦伯格教授发现这些细沙很大一部分是由纤毛虫构成……落下的沙量巨大，甲板上到处都是“尘土”，还会伤人的眼睛；由于空气昏暗不明，船舶不得不停到岸边。即便远离非洲大陆超过1000英里，它们还是会经常落到甲板上。

20多年后，达尔文发表了他的证据，证明所有地球生命都和同一个祖先相关联。但直到又一个半世纪之后，佛得角细沙所掩盖的原子关联才被揭示了出来。

达尔文不知道的是，一条自然形成的风带，正卷着大量粉碎的沉积物从撒哈拉沙漠向他刮来，其中包括1000英里（1600千米）以东的一个特殊风沙点，如今位于非洲国家乍得境内的博德累盆地（Bodélé Depression）。这里汇集了很多偶然性的因素，比如季风，将风力聚焦起来的两座山脉，以及干涸的海床——7000年前，这里曾经有一个淡水内海，面积接近今天加州的大小。如今乍得湖在这里留下的只是它残留的遗迹，曾是世界最大湖泊的湖床如今暴露在外，成了世界上大气沙尘的最大单一源头。赶上风况合适的时候，博德累盆地就像是一把面粉撒到了强力旋转的风扇前。

每年从撒哈拉沙漠飞越大西洋的矿物质颗粒和硅藻外壳超过两亿吨，而地质学家估测，在过去的1000年里，仅仅是博德累盆地就有差不多10英尺（3米）厚的沉积物被刮走了。有一些沙尘就在沿途沉积，覆盖了船只，阻塞了设备，也让科学家们为之着迷。不过这些干燥阴云中所含的原子，引起的可不仅仅是一点好奇心，它们也影响了佛罗里达和巴西的食物链，其中一些甚至已经通过牛肉、海鲜、咖啡或巧克力进到了你的身体中。

有的时候，博德累上空的风会在几天里将70万吨沙尘吹起一英里（1.6千米）或更高，而卫星显示它们穿越撒哈拉沙漠只需要不到一周的时间。大多数沙尘会和北非其他干旱地区的沙尘一同落入海洋中，但是每年仍然会有大约5500万吨沙尘飞跃大西洋，落入亚马孙盆地中。

亚马孙雨林富饶而高产，但这里的土壤却没有你想象中那么肥沃。强烈的风化作用，要么是将营养物质都洗刷到下游，要么就是将它们束缚在坚硬的沙砾中，而快速吸收的植物则会清除大部分动植物遗骸。对于这些树木而言，为了给它们的细胞色素和其他分子索取更多铁原子，就只有依赖从非洲刮来的东风了，因为风中携带着含铁的沙尘。

曾经是雨林的养牛场也沐浴在免费的矿物质肥料风沙之中，因此草食性的牛群所吃的饲料，也包含着一些曾在远古热带大湖中漂过的原子。同样的沙尘也降落到了其覆盖区域之下的咖啡与可可种植园，因此在你喝的摩卡—爪哇咖啡中，或许同时也有从非洲“进口”的铁原子。

大多数飘往亚马孙流域的气流发生在冬季，不过在夏天的时候，这些尘土会飘到更靠北的区域，将这些来自撒哈拉的原子撒向加勒比海地区和美国东南部。有些地质学家怀疑，加勒比海地区很多岛上的铁锈色土壤，很可能就是数千年来这些非洲来客堆积起来的结果。气流也会携带其他乘客，包括活着的蝗虫、杀虫剂、过敏性真菌孢子以及各种有害微生物。巴巴多斯与特立尼达的哮喘发病率在全球位居前茅，一些流行病专家便将其归因于这些随风而来的异域病原体。

在开阔的大西洋上，陆地、空气与海洋的原子联系更为紧密。在这里，铁元素的富集过程可以说明，当一种之前通常都是被渴求的短板营养物质被添加到生态系统中时，将会有什么现象发生。大部分海面上，

既接触不到海底沉积物也没有河流出海口带来的淤泥，铁元素的匮乏便限制了浮游生物的生长。但撒哈拉沙尘覆盖之下的海面可不是这样。根据一些推测，每年有7000万吨以上来自博德累的铁原子会补充到海洋中，超过全世界河流向海洋输送总和的20倍。



2006年11月，加那利群岛上方出现的羽状沙尘暴，从西撒哈拉地区吹向海面。感谢杰夫·施马尔茨（Jeff Schmaltz）提供的NASA照片，戈达德航天中心中分辨率成像光谱仪（MODIS）快速响应小组

海藻消耗了大量这些从空中而来的恩赐，不过另有一种微生物则几乎完全依赖这些非洲之铁。俗称“海锯末”的束毛藻（Trichodesmium）是一种红褐色的海生蓝藻，一些学者认为红海便是由此得名。与上克拉马斯湖中的束丝藻一样，它们也可以利用溶解于海洋表面的空气自行固氮，而固氮作用使得束毛藻对于非洲沙尘尤为敏感。

固氮酶的主要作用就是捕获氮元素，它也是所有生物分子中含铁量最高的几种物质之一。你的每个血红蛋白分子携带4个铁原子，而一个固氮酶复合体则携带34个铁原子。富含非洲铁锈沙尘的降雨将赤道附近的大西洋变成了一座“良田”，缺铁的固氮生物在此茁壮成长，尤其是束毛藻，它们将尘土颗粒溶解后吸取其中的铁原子。跟我们人类用氮肥去给草坪施肥一样，束毛藻接着释放出来的氨又成了其他浮游生物的食物，由此支撑起来的食物链，最终给你的餐桌送去了鱼虾海鲜。当然，这些含氮化合物的受益者并非都对我们有益。有的时候，尤其是夏天，美国东海岸的海水会变成血红色。这种现象被称之为赤潮，是因为甲藻数量爆发而导致的危险事件。这些细胞含有神经毒素并且毒性极强，人吃下被它们污染的海洋食品后，就会有瘫痪或死亡的风险。在这其中有一种毒素叫作“蛤蚌毒素”，可以阻塞神经元中的钠通道，而这也是束丝藻爆发时偶尔会产生的毒素。鱼类和海牛有时也不能抵御赤潮，即便只

是轻微爆发，贝类养殖场也都会关闭，游泳者也不能下水，而当地经济则会受损。这一系列严重后果的导火索不仅仅是铁，也和束毛藻的固氮行为有关。

对你来说，获取铁元素就简单多了。你不像亚马孙热带雨林的那些树，固定在一个位置不能移动，你也不用像热带的浮游生物那样等待铁原子从天而降。人们直接从地下开采出铁，然后将它运到任何有需要的人手中，而且我们还可以依赖粮食作物从土壤中为我们提取铁元素。当然，确实有些人是缺铁的，并且被诊断为贫血。但是对我们大多数人来说，缺铁并不是值得担忧的营养问题。大多数食物给我们提供的铁都超过人体所需，而且它还可以在体内高效循环，因此一名普通成年人每天只需要补充几毫克铁元素替代流失或排泄掉的那一部分就够了。

如果有什么元素会限制人口增长，那么它一定是比铁更稀有或是更难采集的元素。它应该是对我们来说不可缺少的，但应该也可以被其他生物得到，并为了获取它跟我们形成竞争。它应该不是很容易随着大气四处飘散的气体，而最重要的是，它应该很容易因为疏忽而被浪费或流失。

磷元素就恰好完美地符合上述推测，一些富有远见的专家已经在警告可能出现的磷短缺问题。你的体内大约携带了1磅（0.45千克）磷元素，大多数都在骨骼内，但还有很多是你细胞的重要组成部分。跟石油一样，磷是一种有限资源，迟早都会成为人口数量的限制因素。同时，就跟其他任何一种生命元素一样，滥用或过量时它又会成为死亡杀手。

磷为何如此重要？为了更好地理解这个问题，近距离地观察一下原子的你也许会有所帮助。我们就从观察镜中的自己开始，你可以通过研究你自己的反应，很轻松地和身体中的磷来一次面对面的交流。

和身体中的磷来一次面对面的交流

当你看着镜子中的脸时，你看到的主要是皮肤。肉质的脸颊上包裹着薄薄的一层皮肤细胞，就跟葡萄皮似的——当然也可能是葡萄干，这取决于你的年龄和肤质。一般成年人所有皮肤的总重为8到10磅（3.6到4.5千克），其中大多是由水和油脂构成。不过你看到的最明显的都是皮肤最外层的表皮细胞干燥后的残留物，如果你能透过这层薄薄的屏障窥探内层组织，检查一下那些包裹在活着的细胞外围的薄膜，你就可以看到，你向世界所展现的，最显著的部分就是磷原子。

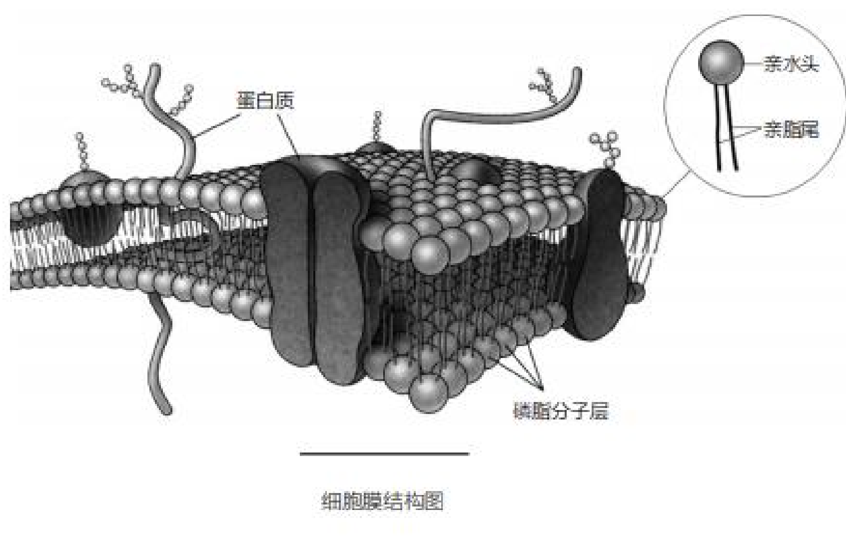
严格来讲，这也不仅仅是磷原子，而是更为复杂的磷酸酯分子围住了你的细胞。构成磷酸酯的磷酸基的形状就像是手上抓着的一堆气球——四个氧原子就是那些气球，而磷原子就是拳头，牵住气球的线则是共价键，整个基团还可以和其他分子相连，比如油脂分子或更多磷酸酯。这种伙伴关系的灵活性对于保持你的生存与意识状态是非常重要的，而当生存不是太急迫的问题时，它还有助于让你的衬衣保持干净。

还记得我们将水体的富营养化归因于含磷洗涤剂吗？这些洗涤剂之所以能成为水藻肥料的原因之一就是，它们很像细胞膜中那些富含磷的分子。就拿你自己的细胞膜说吧——你身体中每一个细胞都是由双层磷酸酯包裹的，油性物质被这两层磷酸酯夹在中间形成三明治结构。这并不是一个固定不变的屏障，而是一层富有弹性的半透膜；当它暴露在水中时，由于其独特的分子结构带来的自组装特性，这种结构会自发成型。

细胞膜中的磷脂分子就像是古代神话中的一些奇怪物种，例如美人鱼和半人马。要想搭建磷脂分子，你需要取一个磷酸基的“头”，再接上一根或几根由碳氢原子构成的脂肪酸“尾巴”。带有少量电荷的头部会吸引水分子，而油性的尾巴则更希望和它们的同类混在一起。当你将足够的磷脂混合后放入细胞所处的含水介质中时，它们会自动有序地排列形成双层薄膜，磷酸基的“头”和“头”会挨在一起形成薄膜的两个面，并且都朝外指向水，而尾部则尾对尾地团在内部，像是被夹在两片面包中的

黄油一样。你脸颊的皮肤表面，就是无数密密麻麻的头部为磷酸基、尾部为脂肪酸的脂质分子。

细胞膜分子与洗涤剂的相似性也可以解释，为什么后者可以将衣物上不易溶于水的油污洗去。当洗涤剂被倒入洗衣盆里时，负电性的磷酸头部便会与水分子的正电端结合，这样的吸引力就会把洗涤剂拉入水中。此时洗涤剂的尾部还在后面拖着，直到它们遇上衣服污斑上的脂质，从而引发一场拉锯战，最终涡流将洗涤剂连带油斑连根拔起。



细胞膜结构图

在含磷洗涤剂被禁止之前，你用过的肥皂水会直接冲入河中，于是一些幸运的水藻就会抓住它们，获取其中有价值的磷酸基头部。如果规模够大，再考虑其他诸如市政污水、化肥或腐殖质中的磷源，那么你就会看到波罗的海、墨西哥湾与上克拉马斯湖的多彩变幻。磷元素也可以让你自己身体里的细胞茁壮生长，就像它会刺激水体中浮游生物的生长一样，原理也差不多。

那么你体内多达10亿亿亿颗磷原子这会儿都在做些什么呢？它们中的大多数正参与支撑着你的磷酸钙骨架，而剩下的那些，大多数在遍布你从头到脚的细胞膜上振动着。它们通常会远离你皮肤的最外层，然而，这都是在它们所处的死细胞迷失到你周边环境前不久发生的。那些

幸存的磷原子会转向内部移动，供身体组织使用，也许这是因为磷原子太过珍贵，可不能每天都跟着脱落的死皮一起被损耗。

在细胞的深处，磷原子也在辛勤劳作着——每一个细胞中都包含一颗包裹着DNA的细胞核，而每一个DNA又都含有磷原子。这些丝状分子通常细到在一般显微镜下都看不到；不过如果你将身体内所有上万亿个细胞中的DNA首尾相接，它们可以延伸到冥王星轨道之外。每两条相匹配的DNA链绞在一起，较弱的氢键在双链的缝隙之间架起桥梁，最终形成著名的双螺旋结构。尽管DNA的编码中隐藏着海量基因信息，但它实际上只由四种含磷的“砖块”构成，也就是所谓的核苷酸。

为了读出你的基因编码，酶首先会将DNA链解开，将核苷酸暴露在外，就像纸带阅读机一样，而这里就是磷对你来说尤其重要的另一个地方了。当DNA链间较弱的键像拉链一样打开或闭合时，磷酸基之间的强键仍然可以保持DNA骨架的稳定性。如果没有强力的磷酸键作为支撑，你的基因恐怕就会过于脆弱而不能被读出了。

这其中有一种核苷酸叫作三磷酸腺苷（adenosine triphosphate），也就是ATP，在基因中也可以独立工作。这个过程中它的主要任务是充当细胞的“化学电池”，此外它还能让你的四肢运动，并让你能够用视觉、触觉和味觉去感知这个世界。ATP分子的神奇之处源于它所携带的三个相连的磷酸基。当最外层的磷酸根脱落时，由此释放出的小型能量波，可以让你实现各种动作，ATP则变成了ADP（adenosine diphosphate），即二磷酸腺苷。当再次装回磷酸根之后，ADP又变回了ATP，你又可以带上这个重新充满能量的化学键，将其用到需要的地方，比如开启细胞膜的离子泵，制造激素分子，或是细胞的其他各类需求。

为了让身体正常运行需要巨量的ATP参与工作，仅仅是呼吸、思考以及输送血液这些日常活动，你每天需要的ATP就几乎和身体等重。不过好消息是，ATP的循环速度很快，所以在特定时间里，你只需要在身体里随时储备几盎司就够了。但是另一方面，由于磷的匮乏，你却可能早早地就死于李比希定律。你的线粒体为你完成了大多数循环过程，从食物中获取能量，并将最重要的第三个磷酸基送回到ATP分子中；你吸

入氧气主要是为了给你的ATP工厂提供能量，而这些工厂中的ATP也为你的呼吸提供能量。

当然，更为充足的生命元素对你来说也很重要，毕竟，你的身体主要还是由氢和氧构成的大水袋，不过磷元素尤其珍贵，主要是因为它更难被获取。几乎每一片细胞膜和每一个提供能量的细胞都对这种重要元素有需求，这也使得它成为了一个你与世界上其他生物之间普遍联系的纽带。

最可能对全球人口形成限制的资源

这些磷原子究竟来自何处？它们还将为地球上这几十亿人服务多久？在所有这些生命原子中，磷或许是在任意给定时间里，最可能对地球人口形成限制的资源，尽管专家们对限制我们的资源是什么这个问题还有不同意见，或者更确切地说，他们对这些资源在什么时间以什么方式对全球人口形成限制尚未形成统一意见。

举个例子，我们已经听过太多有关“石油峰值论”的故事。煤炭、石油和天然气是由植物与浮游生物经过数百万年形成的，而当它们被用作能源时，我们撕开它们的原子并送到风中，一同被挥洒的还有将这些原子保持在一起的能量。我们永远也不会将构成它们的这些原子耗光，因为碳原子和氢原子的数量都非常庞大。但我们可能很轻易地在一个世纪左右的时间里将物美价廉的化石烃类分子消耗殆尽，因为我们使用的速度远快于它们形成的速度。

理论上讲，种植粮食作物或水藻也可以将空气与水转化成烃类，从而替代我们所焚烧的燃料，然而成本、物流或伦理方面的问题，却使得这些生物燃料难以达到足够的规模以满足人类需要。然而最终，不管人类的技术与社会适应力如何发展，生命所能获取的原子绝对数量，将决定地球人口的极限。

用最简单的话来说，就是我们并没有制造用于维持身体的原子，而仅仅是从环境中借来了它们。那么，增长的纯粹原子极限是什么呢？如果能对此进行估算，那么我们至少可以明确一个长远的界限从而更好地预测人类的未来。

任何移民月球或火星的理论计划都先放到一边吧。现在的问题不是像扩散孢子那样保存人类这一物种，而只是关系到必须在地球上继续生活的这几十亿人，因为他们永远也不可能登上那些想象中的星际飞船。太空探索以及实现这一过程的技术给我们带来的震撼，很容易让我们对一件客观事实产生盲目——迄今为止，在我们能力所及的范围内，这里

仍旧是对我们来说最适合定居的故土。相比于太空中冷酷的虚无，以及宇航员跟星际移民不得不生活的那些监狱般的条件，即便地球上最没有吸引力的城镇也胜似天堂了，所以当我们向其他星球进发之时，可不能忘了跟地球保持联络。

为了开始这个思维实验，你的很多原子都会派上用场，当然准确的数目不可能被测定。你在不断地掉落原子，但同时也在从呼吸与食物中获取新的原子，因此随着时间变化，原子总数也在因人而异地发生波动。并且毫不奇怪，不同专家对人类平均原子数目的估算结果也不同。不过与其花太多心思去顾虑数据的精确性，还不如为了便于说明选择一组合理的数据。

1998年，一篇题为《纳米医学》的文章发表在“前瞻协会”的网站上，作者罗伯特·弗雷塔斯（Robert Freitas）提供了这样一个数据库，这也是我书中相关数据的来源。根据弗雷塔斯的测算，你身体内的原子总量是个天文数字。如果你的体重是150磅（68千克），那么你的原子总数将会大大超过宇宙中可以看到的恒星总数，用科学计数法简单书写出来就是7×1027个原子，但如果要完整写出来，那就是数字7后面带上27个0，或者说是7千亿亿亿。而至今我们所知的恒星总数，大约是这个数字的几千分之一。

如此巨大的数字还是需要一些更直观的形式来加以描述。如果你的原子大小和沙子体积相仿，那么你可以用它们填满大约两万亿个奥运会标准游泳池。那么两万亿个游泳池看起来又是什么样子的呢？如果你真想寻找答案，那么找个地方挖出这些游泳池首先就是个麻烦，因为这相当于整个地球表面积的五倍。

我们还可以用钱来举例。如果每一个原子都是一张百万美元的钞票，而你每秒钟都可以花掉其中一张，那么全部花完它们需要多少时间？别去考虑实际情况了，因为这样你每年可以豪掷36.5万亿美元，如果你乐意的话，足以在半年内付清整个美国的债务了（按2013年底的数据计算）。但如果你要花光剩下的部分，从现在算起还需要222万亿年，届时，宇宙中的所有恒星早就耗光了它们的氢燃料，并已被黑洞、白矮星或寒冷的灰烬所替代。

然而更富想象力的画面还是出自诗人奥利弗·温德尔·霍姆斯（Oliver Wendell Holmes）的那一句话：“用我的灵魂，再筑三座市政厅。”与市政厅一样，你的身体是由几种相对简单的原材料构成的，尽管从巨型超新星爆发而产生的少数稀有重金属——如锌和银——会像给地板抛光一样修饰你的分子，但你身体内主要的原子种类屈指可数。

在你身体的这座“市政厅”中，氢原子和氧原子就好比是砖块和灰浆。一个150磅（68千克）的成年人体内大约有90磅（41千克）都是水，这也是你身体中最主要的氢和氧。这两种原子在遍布着海洋的地球上非常丰富，在我们对原子极限的探索中根本用不着考虑。

当然对于一座大厦而言，光有主材是远远不够的，而且其他相对稀少的材料才会让市政厅变得独一无二。这些“次要”元素中最主要的一种就是碳，你可以将它想象成市政厅中的木材。根据弗雷塔斯的数据，碳大约贡献了体重的1/4，也就是说，150磅的成年人大约含有35磅（16千克）的碳元素。

地球上的碳储备可以“造”出多少人？其实光算上大气就足够多了，因为风中以二氧化碳形式飘散的碳元素总量有大约5000亿吨。如果将这些碳都转化成构建人体所需的形式，足以供大约30万亿人使用。

要实现如此奇异的结果，当然还需要在其他元素可以充足获取的前提下，而且你还需要在造出每个人后让他们都待在干爽的陆地上。然而如何实现后一个需求就很值得怀疑。如果你让30万亿人全部紧挨站着，每个人只占一平方米的空间，那么这么多人将覆盖整个北美洲、中美洲和差不多三分之一个南美洲。在这样的场景下，你在担心碳被用完之前，早就应该需要考虑基本的生存空间是否够用，毕竟这还只是考虑了大气中的碳而已：海洋与沉积物中的碳还要多上好多倍。

除去上面考虑到的氧、氢和碳，其他可能对实际人口上限有影响的元素总量加起来只在你的体内占4%，于是你身体这座“市政厅”的价值也变得更为清晰。为了破坏建设计划，你其实不需要限制主要的原材料供应：比例虽小但同样必要的某种材料出现短缺，一样可以有效地形成限制。在这个比喻中，磷原子可以被想象成螺丝、钉子以及你身体中的电池，而很多专家都在担心这些原料的供应已经极度短缺。《外交政策》

杂志于2010年发表的一篇文章说到“磷元素峰值危机”可能是“你从未听说过的最严峻的自然资源短缺”，而最近《新科学家》又发文称其为“潜在的全球性主要环境危机”之一。

那么能够为你的牙齿、细胞膜及身体其他部分提供磷元素的源头都分布在这个星球的哪些角落呢？它们中的大多数都被你踩在脚下。尽管坚硬厚实的玄武岩以及其他火成岩有时也可以被用来开采磷，但它们很低的矿石含量（很少能高于5%）和开采难度，迫使我们用更集中的资源用以喂养这个饥饿的世界。我们如今开发的最有价值的磷矿，都是由发生过富营养化的古老海洋“再生”而来。

在远比恐龙诞生更久远的年代，真菌与植物都从早期的土壤中开采磷元素。雨水将一部分磷原子冲刷到海洋中，浮游生物将其截获，而剩余的那些还在供养着陆地生物。驻扎在你体内的那些磷原子曾经属于数亿年前很多种不同的生物，其中一部分甚至会让你感到不可思议。想象一下，你身体中的部分磷原子曾经以你想成为的各种生命形式，在地球上翱翔、游弋、爬行或蠕动，而且这些关于生命的幻想很有可能曾经就是现实。

如果你是一名典型的美国人，那么给你吃的素食与家畜的饲料增肥的磷，主要来自北卡罗来纳州或佛罗里达的古海洋沉积物，还有一小部分来自摩洛哥。而海洋食品中的磷，主要是从海洋食物链中直接得到；培根、鸡蛋这些畜禽食品中的磷，则由鱼类饲料提供。不过追本溯源，最终这些都会带着你回到海中，而这也是限制我们增长的终极问题。

磷元素会枯竭吗

化石猎人们都喜欢在北卡罗来纳州的奥罗拉海岸搜寻猎物，而这片平坦的沙滩是一个露天矿。全世界最大的磷矿生产商之一也坐落于此，那巨大的挖掘机，铲斗就跟车库大小相仿。加拿大钾肥公司的雇员们用这些威武的设备，将覆盖于表面成吨的沙土、贝壳与白垩清除，堆在一起，这些沙堆吸引了四面八方的收藏者。在这些灰色的矿坑之中，埋藏着数百万片磷灰石化石，它们曾经帮助巨鲸游泳、协助鲨鱼啃咬、托起海鸥飞翔。地质学家和古生物学家们不远万里来到此地，挖掘着这些200万到500万年前的遗迹，甚至其中有一部分已经接近2000万年了。这些珍宝中，有石化的鲸椎骨，有长达6英寸（15厘米）的巨齿鲨牙齿，以及尖嘴海雀祖先精致的翼骨。

不过更有价值的宝藏还在上百英尺的深处，尽管它们在展示柜里看上去都很无趣。矿主的首要目标是具有黑色光泽的磷灰石颗粒，大的直径有几英寸，而小的只有罂粟种子那么大。钾肥公司每年都会开采大量矿石，将它们运输到全世界的化肥厂和销售处，最后将磷原子送到你的食物中去。

奥罗拉地下蕴藏的磷矿石意味着这里曾经爆发过超大规模的富营养化事件。而如今因为人类的影响，在它们的发源地，滨海富营养化事件变得更加寻常，农业与市政污水造成水藻泛滥，同时气候变暖造成海平面上升正在一点点吞噬着海岸线。奥罗拉的沉积物与上克拉马斯湖及上文提到的试验湖区变色后的水有很多共同点，尽管它们在人类出现很久之前就已形成。

想象一下，如果将上克拉马斯湖的绿色湖水拓展到50英里（80千米）宽，并且覆盖几乎整个卡罗来纳海岸线会是什么场景；而这正是墨西哥湾暖流靠近海岸并与大陆边缘的海底隆起以及海角发生撞击时产生的现象。这样的喧嚣掀起了下层的海水，大量的磷和其他营养物随之被翻腾起来。当重度营养化的海水抵达阳光普照的海面时，它们引发的海洋生物大爆发，其回音直到今天依然在我们身边回荡。

浮游生物让海水变得浑浊，并供养了大量小型生物，而后者又成了大型鱼类、海豹及海鸟的捕食对象。鲸将这些营养物质富集起来，可能还会因此产下幼崽；而这些幼崽可能会不幸死于巨型鲨鱼的利齿之下，在尸体被吃完后留下一堆白骨。此外，死去的浮游生物像地毯一样铺在海床之上。数百万年后，你的骨骼还有牙齿中的部分磷，就来自于这些腐败物之下埋藏的化石。

在缺氧的海底沉积物中，细菌时常光顾这些浮游生物的墓地，吃掉腐烂的细胞，从中吸取碳原子与氮原子，留下密实的含磷颗粒。这些沉淀后来成为了小麦和玉米所用的化肥、母乳中的磷，以及你最爱的软饮中富有活力的磷酸。

墨西哥湾的这类事件在1800万到2200万年前之间发生过几十次，也许是因为海平面的周期性上涨造成。这种波动的周期大约是10万年，与气候变化的周期吻合，因此冰川期可能在此过程中扮演了重要角色。极地冰雪的融化，一次又一次地推动海平面上升，让墨西哥湾暖流得以冲破大陆架，而先前却因为太浅而不能越过。每一次海水对大陆的回访都会引发更多的上升洋流，并让更多的磷沉降下来。如今，北卡罗来纳州海岸沿线附近较薄的矿床，已经被一路赶到大陆架边缘的年轻沉积物所覆盖，近海海水之下已经达到或超过了1000英尺（300米）。

那么这和我们增长的原子极限有何关联？科学家们对地球上有多少磷可供人类使用没有统一的意见，不过美国地质调查局报告称，全美拥有的磷矿储量大约有14亿吨。如果按平均纯度30%计，这些磷矿可以产出4.2亿吨的P2O5分子，或是1.85亿吨磷原子。理论上讲，仅仅是美国的磷储备就可以供给3700亿人口——超过目前全球人口的50倍。如果再加上其他一些主要的磷矿高储量地区，如摩洛哥的总储量据说达到500亿吨，那么就会得出和用碳计算人口上限时同样荒谬的结果。

那么，为什么会有那么多科学家警告磷短缺的危机呢？如果依赖我们确信的这些来源，按照现在的全球开采与消耗速度计，那么最迟到下个世纪，我们可供开采的磷矿就不足了。不过并非所有人都接受这个结论，而且过去很多质疑资源紧缺的观点后来都被证明是错误的。

显然，地球上还有足够的磷，可以供应的人口总量远比我们乐意与

其共同分享世界的要多，而不断减少的供应量，会使得如今的低品质沉积物在未来变成值得开采的矿源。不过磷的循环可不仅仅是将原子直接从矿石送到你的肋骨中那么直接，简单地计算一下可能供养的人口，并没有考虑维持人类生存与健康的额外需求。幸运的是，这些问题的最大因素，应该就是我们自己可以控制的那一条——挥霍无度。

我们从土地中获取的磷元素，有80%～90%都根本没有到达我们身体之中。它们中的一部分长成了棉花，最终成为服饰，而撒在田间的磷，至少还有一半并没有被目标作物所吸收。在植物的根吸收它们之前，雨水就已经将磷冲到了地下水或河水中，所以很多时候，化肥的施加量高于植物真实的需求。在作为牛饲料的玉米中，磷的宿命常常是远离田边的牛粪，久久不能被循环利用。食物浪费和从田头到餐桌过程中的损耗，都使得最终抵达我们体内的磷原子只不过是从地下冒出来的一小部分而已。

虽然这些原子在脱离了我们掌控之后并没有在地球上消失，但其中的大多数流落到了我们客观上不可能开发的角落，最主要的地方就是湖底与海底。如今，大河河口的三角洲正在将大量被浪费的磷原子掩埋，而它们刚刚才被人类花了很大代价和努力从类似的源头开采出来，却又被存储到了更难抵达的位置。在它们从陆地前往水下的旅途中，还会破坏支撑人类生存的生态系统。由磷引发的死亡区域遍布世界各地，由此引起的鱼类死亡还有其他水质问题，也造成数十亿美元的经济损失。

社会与经济因素也让李比希定律的阴影像幽灵一样横亘在人类通往未来的道路上。全世界大多数磷矿石主要就由三个国家生产：美国、中国与摩洛哥。于是，这些国家的磷资源也意味着一种强势，影响着其他很多化肥用磷几乎完全依赖进口的国家。

考虑到严重耗损与对环境的破坏，生产运输的政策及成本，以及现有科技的局限性，“磷元素峰值”的概念也激起了更多反响。国际肥料发展中心估算，全世界范围内，大约还有600亿吨较为集中的磷矿可以比较容易地被开采，很多消息灵通的人士则指出，如果维持现有开采速度不变，这些剩余的存货还能维持50～400年，任何地方都是如此。也有专家持有不同观点，认为可能会有新的资源被发现，开采技术也可能会

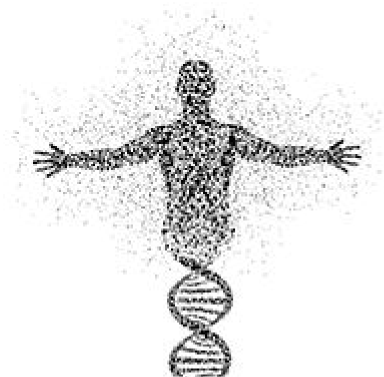
得到大幅提升，因此最终耗光的时间点也许会更早或更晚。但是所有人都同意一点，那就是在纯粹的元素枯竭之前，我们已经面临一些实际的资源竭尽问题了。

我们如何获取并利用磷，还有我们如何过我们的生活，将会决定这一元素以什么方式满足我们的需求多长时间。我们如今已成为全球磷资源从土壤损失到海洋中的四个因素之一，而在整个磷循环的链条中，人类这个环节就如同是一个漏水的水管，将这些来之不易的原子洒向河道，沿途造成不必要的伤害。依据最新的原子观点，我们目前实际的任务应该是无论如何都要将这条循环链重新闭合。

对于我们的未来，与可获取磷原子数目同等重要的是我们自己的品性和生活方式。在这个历史的新纪元，人类心理学已成为地理、生态学与化学过程中不可分割的一部分。举个例子，假如全球主流的素食文化都发展成美国式的肉食文化，那么对磷的需求也将飞速上涨。同时尽管宇航员已经可以从他们自己的尿液中回收出水分子再饮用，但很多人觉得“恶心”并对此持排斥的心理，也会让我们中的大部分人不能接受在地面上用类似的方式大规模回收磷资源。

通过详细的计划，我们已经可以很好地将人体的磷重新送回循环之中。而当我们尝试这么做的时候，对自身原子的认知，也将帮助指引我们更有效地迈入理性而可持续的未来。

9 消逝的肉体——生命和非生命的界限



理解真实的宇宙远比坚持幻觉更好，不管后者让人多么舒心惬意。

——卡尔·萨根

（Carl Sagan，美国著名天文学家、天体物理学家与科普作家）

我宁愿化作灰烬，也不愿落入尘土。

——杰克·伦敦

世界终将会有尽头，你也是如此。这样说只是防止你误会。

当你第一次意识到自己其实也是星际产物，并且呼吸着列奥纳多·达·芬奇曾经呼出的氩原子，想必也会觉得事物的原子特性令人振奋吧。不过，就跟年轻人之间的浪漫在熟识之后会变得稍显平淡一样，当原子真实的一面也开始沉入你的意识中时，可能就会带来复杂的感受。创造之后是毁灭，而生存的尽头是死亡。你血液中那些铁的诞生，摧毁了那些孕育它们的恒星。空气中那些同样没有是非观的原子，拜访过达·芬奇也拜访了你，而在此期间却也曾在阿道夫·希特勒的肺里兜过圈。如今这些维持你生命的原子，最终还是会舍你而去——实际上，当你在读这句话的时候，有些原子就已经离开你了。

你可以算得清身体不同部位的元素种类及数量，并由此总结，自己其实就是氢原子与氧原子构成的水，掺进了一些煤灰和烟尘。如此简单的分析，也许会让你觉得自己不过就是有点智力的泥巴而已，但这并没有揭示你与无生命的黄土之间有何本质差别，虽说终有一天你也会变成一抔黄土。你如何能成为你自己——一个生活精彩还能自行呼吸的自己——同时还是一堆没有生命的原子？

不幸的是，如果想要得到这个永恒问题的满意答案，你只能依靠自己去探索了，因为直到现在，这个世界上最聪明的脑袋也还没有完全想清楚这一问题。不过原子世界的某些方面如今已被深入了解，足以作为可信任的指南针导向知觉、神话与信仰的脆弱深处。如果不想把自己彻底搞得神经错乱，那么简单想一想原子如何穿梭于我们的身体，对这个问题也是有意义的。

如果你和我们大多数人一样，那么你通常会认为自己的身体就是一个界限明确的稳固实体。每天早晨，你都期待可以在镜子中看到一个和原来一样的自己，而人们也都觉得你需要对曾经做过的事情负责。不过从原子角度讲，现在的你在此刻之后就不会再存续，而你先前做过的那些事，也不过是一个不再属于你的临时粒子集合所为罢了。

事实上，我们很容易看到很多这样的物质流。你不断地吃喝、呼吸还有排泄，你的生命得以延续也正是因为你持续均衡地做着这些事。然

而，要想在进出身体的这些物质之间确定合理的联系可不容易，更不用说在你体内它们干了些什么，除非你通过原子的概念来思考这个问题，并借助一点恰当的比喻。举个例子，假如你可以将自己想象成一条河流，那么这些事情就会产生不同的感觉了。

下一次当你到访自己最喜爱的那条河流时，不妨试着去数数其中的水分子。可这是徒劳的！这当然是水分子颗粒太小而数量又太过庞大的缘故，但更大的问题是，在你还没有数清的时候，它们就已经离开了。常言道“流水不腐”，流动性是区分河流与湖泊的特征。你可以给河流命名，再看到时也能辨识出来：“哦，我们现在到了……伟大的密西西比河！”你或许会喊出来，就好像它跟人行道一样从未有过变化。一般你并不会这么说：“在这一瞬间，数以兆亿计的水分子临时流过我的面前，但下一秒，所有水分子都会向海洋的方向移动一点点，有些已经离开了我的视线，也有很多新的水分子补充过来。”如此等等。两种表达方式都可以说是正确的，但前一种简化的版本从实际角度说，显然更容易被我们所接受。

这种对生命更简单的理解方式让我们的祖先生活得很不错，而且让我们人类这一物种延续了好几千年。不过如果你能为了获取单纯的乐趣，安安静静地读一些类似于本书的科普读物，那么你将能够更深层次地挖掘“我是谁”的问题。

原子运动造就了河流的涨落，也造就了你这短暂留存的身体，而你——不管这里的“你”是什么意思——只是在其中的物质流回广阔的全球原子海洋前瞬间存在而已。现在想想原子正在离你而去的情形——这并不需要等到你死去时身体在风中、水中或泥土中零落，这已经是正在发生的事实了。

原子的流逝和更新会伴随你的一生

如果你首先注意到大量物质在你的身体进进出出，不妨用你的方式缩小观察范围，那么你可以通过这些显而易见的事实得出令人咋舌的结论。不过既然你思考的是无生命的元素与有生命的组织间存在的双向物质交换，那么请记住：理智的外界限就在这里。

当你抿下一口水时，它并不只是在为你解渴。从另一个意义上讲，它成了你的一部分。水顺着你的食道流下，用不了几分钟，也没有经过任何变化，就成了你血管与肉体中的主要液体。你血液中的大部分就如同是自来水，只不过其中漂着些细胞、盐分，还有一些有机分子。你耳垂中富有弹性的黏液，或许有一些不久前还在水壶中待着，而你眼睛中的很多水分，或许就来自刚刚下过的一场雨。

你的嘴通常是水分子进入身体的主要入口，但你却是十足的漏斗。《英国运动医学杂志》上一篇有关氢同位素的研究认为，一名久坐不动的成年人每天大约损失7品脱（3.3升）水，其中4品脱（1.9升）通过尿液排出，而剩下的2～3品脱（0.95～1.43升）则通过汗液或呼吸排出。剧烈运动会使非尿液损失达到每小时1～2品脱（0.47～0.95升）。

现在我们看看根据这些事实可以产生怎样的逻辑。你的体重里有接近2/3都来自于水，而你的身体是这股常见液体中的一个旋涡。当然，你从泉水中吮吸的液体并不是活着的，而当你跨过地板上的一摊水时，也不会觉得这是起谋杀案。所以，你大部分身体根本不是活着的，甚至其持久性和特异性都不值得起个专属姓名。

接下来我们考虑一下你的头发。这里正上演着一场“阵雨”的慢镜头画面，无生命的蛋白质从你的头上喷射出来，其速度大约是每个月半英寸（1.27厘米），或者说每年6英寸（15厘米）。每一根纤维都由碳原子、氧原子、超过氧原子数目两倍的氢原子缠结而成，其中洒落了些氮原子，还有少量的硫。发根的那些原子来自于你前几天的食物，还有一些饮料和代谢水，以及你自己回收循环的一些细胞。

你的指甲同样也都是角蛋白，平均每个月会向指尖外长出3～4毫米。脚指甲的生长速度只有手指甲的一半，当它们被剪去或磨损时，外边缘的原子也随之离开身体，并且每天你还会脱落数百万个死皮碎屑。如果你可以对着头发、指甲还有表皮的生长进行拍摄并快进，你可能会因为看着这些皮肤尘埃而崩溃——密林般的蛋白质从你的头部倾泻而出，而你的手指尖与脚指尖则射出一卷弯曲的角蛋白薄片。即便用正常速度播放，脱落的也是大量原子。如果你想长时间保持自己的模样，那么它们都必须被替换。

对自己这种不寻常的延时观察视角，总结起来可以这么说，你是一眼行走的喷泉，不断喷出含有碳酸的水蒸气、液态的水还有蛋白质。你身后的轨迹就是一团看不见的迷雾，其中充斥着呼出的废气和其他脱落物，最终也许会成为你床下的灰尘——或者当你做了什么坏事的时候，也许它们就会成为警犬追踪的对象。如果你真成了这样的逃犯，那么或许你应该试着在法庭宣判前通过原子证据自证清白。“那不是我，法官阁下！”你可以很坦然这么讲（最好语法规范一些），这还要归功于你身体里物质的快速代谢。

相比于还在子宫中的你来说，如今你身体中的原子已经多了很多，因此这一点很明显可以说明，你身体中的大部分都比你自己年轻。不过想象一下你自己不过就是细胞的临时组合，也可以让你身体瞬息万变的事实更加明显。

意大利学者伊娃·比安科妮（Eva Bianconi）及其同事最近研究发现，成人体内的细胞总数平均在37万亿个左右。它们大小形态各异，有大约8微米的红血球和22微米的肝细胞，也有大约100微米的成熟卵细胞（作为对比，盐粒直径约为500微米）。有些细胞在被循环或替代之前只会存活几天或几周，而其他一些则可能会伴随一生。所以，你如何能说清它们哪个是哪个？

估算人体细胞替换速度的其中一个方法是测量细胞内碳14的含量。“冷战”期间，热核武器的大气层试验造成空气中的氮元素转变成放射性的碳14，直到如今依旧污染着空气和海洋。这种不稳定的碳原子以二氧化碳形式进入到植物体内后，又通过食物链进入到地球上所有生物

的体内，其中也包括你。随着1963年地面核武器试验被禁止以后，海洋沉积物中埋藏的富碳有机质，其放射性碳的浓度也有所降低，并且这种变化也在我们身体中得到了反映。如果说热核武器污染有任何一点好处，那也许就是放射性碳的浓度变化，给我们提供了测定细胞年龄的全球性同位素示踪剂。

斯德哥尔摩卡罗林斯卡学院的细胞生物学家奥拉夫·伯格曼（Olaf Bergmann）近期在《科学》杂志上发表论文称，他采用了这一技术研究心肌中新生细胞的生长过程。他的发现终结了两派专家的长期争执：一派坚持认为一生之中，心脏细胞会更新四次；而另一派则相信，我们至死所拥有的心脏跟出生时是一样的。通过测量心肌细胞中的放射性碳含量，伯格曼的团队发现，比起那些出生年代早于核试验的老人，一生都笼罩在污染空气下相对年轻的人们，其心脏组织中放射性碳的含量要高得多。根据这些研究以及其他类似发现，可以看出你的一生中确实会持续生长出一些新的心脏组织，而且随着年龄变化，生长速度也有所不同。根据伯格曼的计算，20岁时，你的心肌细胞每年会更新1%左右，而到了75岁时，这一速度会下降至一半。尽管如此，大部分这样的细胞在你成年后一生之中都将会被保留。

类似的放射性碳示踪剂研究也说明，你身体中大多数细胞的更新速度平均在7到10年之间，不过有些细胞远在这个范围之外。比如说你的心脏，心肌细胞的更新速度就慢于充斥于其中的结缔组织、血管以及其他结构组织。这些部分平均每年的替换率为18%，也就是说你心脏中的大部分年龄都小于5岁。

伯格曼与生物学家乔纳斯·弗里森（Jonas Frisén）后来又在《科学》杂志上发表文章谈到，人类大脑中嗅球和海马体的神经细胞会不断再生。也就是说，如果有什么东西激发了你的回忆，比如烟雾缭绕的篝火或熟悉的香水味道，最初记录这种感觉的那些神经元或许早已离你而去，但那些未曾经历这一过程的细胞却已将记忆保留了下来。你大脑中其他大多数细胞都可以追溯到婴儿时期，但同位素追踪研究也说明，在你的大脑皮层内也会出现一些新的神经元，或许在更新着每一天的点滴经历。

消化道中的细胞没几天就会更新，而这并不让人意外，毕竟它们受着胃酸、胆汁的折磨，并被整个管道的食物与排泄物腐蚀着。生理学家贝恩德·林德曼（Bernd Lindemann）所做的工作中指出，口腔中的味觉细胞寿命大约是10天，而皮肤学家杰拉尔德·温斯坦（Gerald Weinstein）及其团队则估测，皮肤细胞的平均更新时间是39天，也就是只要两周的时间，你的最外层皮肤就会脱落上亿个细胞。这一持续脱落的过程会让你每一到两个月就能换上一层新的皮肤“包装”，同时也稳定地给房间里贡献着灰尘。

红细胞的一生则更为“污秽、野蛮而短暂”（英国政治家托马斯·霍布斯对人性的著名评语。——译注）。它们遍布于几百英里长的大动脉快速通道和只能缓慢挤过的毛细血管中，在你肾脏的渗透丛林中穿过几千条通道时不断被挤压或膨胀，因此大多数在4个月左右就被磨损殆尽，必须由脾脏和骨髓中的祖细胞再生。而科学记者尼古拉斯·韦德（Nicholas Wade）则表示，人体肝脏细胞的更新周期在300到500天之间，也就是说，每一到两年，你都会长出一副全新的肝脏。

瑞典生物学家克斯蒂·斯波尔丁（Kirsty Spalding）和其他一些科学家发现，你的脂肪细胞会维持10年左右，这对于想减肥的人来说是个好消息。过去曾有观点长期认为，饥饿只会使脂肪细胞变小而不能将它们剔掉，当节食者适应了饥饿感后，它们又会像杂货袋一样鼓起来。不过如果你能坚持健康生活足够长的时间，看起来是可以通过去除脂肪细胞帮助你稳定体重的。

你的骨骼与肌肉则会不断地被改造。每年，骨骼密实的最外层中有3%会被更新，而在你四肢关节的多孔骨骼中这个数字则会高达1/4，专家计算认为全部骨骼的平均替换时间为10年。根据尼古拉斯·韦德所说，肋骨间的肌肉细胞大约会维持15年；而当你快20岁停止发育时，跟腱中的胶原蛋白核心就彻底定型了。

最近，丹麦与瑞典的科学家通过同位素分析证明，身体中容易识别出的最年老的结构是眼睛中的晶状体蛋白和牙釉质。如果你的卵巢发育健康，那么当你还在母亲的子宫中时，你就已经携带了几千个到几百万个微型卵母细胞，这些原始细胞和你的年龄差不多大，将来也许还会发

育成你的孩子。至于文身，由于墨水并非细胞质并且不会被代谢，因此虽说它们比你年轻，但也永远不会消失，如同玉米地里的鹅卵石一样，而皮肤就好比是一茬茬庄稼。

总的来说，你的身体组织就是由新生细胞、永生细胞和将死细胞构成的混合物，大多数还是比较年轻的。所以，无论你觉得自己做过的事该如何被赞同或责备，事实上都已经不是你的所作所为了，不是吗？在这个疯狂的世界观下，最有嫌疑的罪犯或许就是你的眼睛、牙齿和一些大脑组织，或许还有你未来孩子的“种子”。

如同你的身体比大多数细胞更老一样，你的细胞也比其中逗留的大多数分子更老。因此，你的表观年龄可以又降低一个数量级。

在史密森学会1954年发表的一篇高被引文献中，物理学家保罗·艾博索尔德（Paul Aebersold）讲到，我们身体中几乎所有的原子每年都会被替换一遍。在参考了一些人体生理学有关放射性同位素最早的研究数据后，艾博索尔德宣布：“每一到两周，我们身体中一半的钠原子都会被新的钠原子所替代，氢原子与磷原子的情况也类似。甚至有一半碳原子都会在一到两个月内被替换。”接着他又补充道，“一年内，我们身体中大约98%的原子都会被我们从空气、食物及饮料中获取的其他原子所更替。”在理查德·道金斯创作（Richard Dawkins）的《上帝错觉》（The God Delusion）以及比尔·布莱森（Bill Bryson）所著的《万物简史》（A Short History of Nearly Everything）中也反复提到，此刻你身体中的任何原子或分子，几年后都将不再属于你。这样的说法可以迅速激起人们对于世事无常的共鸣，可是到底有多准确呢？

仅仅是水的周转过程就可以让你身体的近2/3在两到三周内完成更替，实际的消失过程甚至更快。水分子之间会快速交换氢原子，也会和你骨骼及组织中更大的分子共享原子。最近在一次全国公共广播的谈话节目中，通讯记者大卫·凯斯特鲍姆（David Kestenbaum）与哲学家丹尼尔·丹尼特（Daniel Dennett）说了个关于斧头年代的笑话，和这种情况很类似。他解释道：“玻璃柜中陈列了一把斧头，（有人）说这是阿拉伯罕·林肯的斧头。然后我就问他，这真的是林肯的吗？然后他说，当然啦，只不过斧刃换了两次而斧柄换了三次而已。”

在消化的过程中，你的细胞也会把水分子拆开，把碎片接到食物的分子碎片上。当细胞随后将这些碎片重排成个人专属分子时，又会产生新的水分子，并将氧气转变为代谢水。因此可以肯定，你的下一次呼吸会让你自己的一些原子消失不见。

一名150磅（68千克）的成年人体内大约含有24磅（11千克）蛋白质，不仅是在肌肉和肌腱里，还有其他数千种形式。每天，有11到14盎司（312～397克）的肌肉会被分解并替代，不同蛋白质的寿命可以从几秒到数年不等。比如，肌肉蛋白中有近一半都是由肌凝蛋白纤维构成的，平均每天会有1%～2%被替换。血液中的血红蛋白更替速度与此接近，而线粒体中提供能量的细胞色素，每4到6天会有其中一半被循环。根据生理学家伊夫·舒茨（Yves Schutz）发表的论文，仅仅是对蛋白质不断的修饰和修复，就会占去你休息时20%的能量，你边看电视边吃的饼干，每五片里面就会有一片的热量因此被消耗。

那么前面对你元素更新的估算到底怎么样呢？你的牙齿与眼睛中含有你出生时就携带的原子，骨骼与跟腱中也含有幼年时期获取的原子，因此一些作者所说的彻底更新就夸大其词了。每年骨骼的更新率大约为1/10，但是骨骼中不含脂肪的干重大约占到总体重的7%，因此几乎与此等重的矿物质通常会维持一年以上。另一方面，尽管你的一些细胞会维持很久，但其中的分子和原子却会快速地来来去去：仅仅水和蛋白质的循环作用，就可以在几周的时间里替换超过3/4的原子。考虑牙齿、眼睛、跟腱与骨骼中的稳定成分，身体总的原子更新率大约会比艾博索尔德估计的每年98%低几个百分点。

至于最终精确的数字，你都可以展开辩论，但有一点是明确的：在你弄清楚这一切之前就已经死了。通常伴随死亡的原子消散过程，其实是我们的生命中正常而持续的一部分，自打出生后，我们就在不断地“融入”这颗星球的元素大池塘。

当然，反过来讲，如果你想活得更久一些，就必须在失去原子的同时，以相同的速度对其进行吸收。你的身体可以收集这些生命原料，加工、分类并最终利用它们，这是件多么了不起的事！对于周边环境而言，你就像一条河流那样，既是消费者也是源头，而且这种原子关系可

以远远地延伸到你身体以外。你的原子，不仅与地球之间有着象征性和生理性的关联，同样也和地球居民还有太阳系之间存在着关系，甚至也连接着更广阔的银河系。

你的一部分原子来自宇宙射线

1991年10月15日，在犹他州盐湖城西南的杜格威试验场，一种本不该出现的不明物体撞进了蝇眼宇宙射线探测器。这个意外来客比原子还要小，蕴含的能量却不同寻常，以致物理学家皮埃尔·索科尔斯基（Pierre Sokolsky）对此形容道：“就像一块铅砖砸到了你的脚趾。”相比于新墨西哥州一台探测器在将近30年前遭遇到的另一颗粒子，这一颗的能量还要强上好几倍，冲击力大得惊人，所以它究竟是以何种方式被抛出的，在当时并不是很清楚。在1991年这次破纪录的宇宙“飞弹”袭来之后，大为吃惊的科学家们将其称为“我的天哪粒子”（Oh My God Particle）。

蝇眼发现的这枚粒子至今仍然因其绝对的冲击力而保持着纪录，不过如今已有更多类似的宇宙粒子被检测到，天体物理学家也开始理解它们是什么，并推断它们从何处而来。这些粒子多数以近乎光速的速度旅行，可能来自最靠近银河系的那几千个星系中的某一个。确定这一距离范围的依据是，即便是最快速的粒子，在与星际尘埃以及其他星际间障碍物碰撞时都会损耗能量，因此像“我的天哪粒子”这么高能的粒子，其旅行距离应当不会超过1亿光年。科学家们猜测了不少源头，包括垂死恒星的等离子体或超大质量黑洞的辐射物。

这些超高能粒子的存在，拓展了20世纪以来科学家们对空间粒子光谱的认识。早期的研究者注意到，空气中存在着不明物质，经常会损坏电气设备，并猜测罪魁祸首可能是地球上的矿物放射线。然而，在将验电器经由气球发射到高空或是直接放置在不同海拔高度的山区之后，物理学家们发现越是远离地球中心的地方，这种袭击越频繁——射线源远在地球以外，而非来自地球。

这类宇宙“射线”是高速飞行的小不点儿，具有质量与能量，从四面八方向我们袭来，大多数是质子，但也包括电子、离子化的碳核、铁以及其他元素，而几乎没有质量的中微子可以穿透整个地球，从你的天灵盖穿过之后继续它们的长途旅行，不会在你的身上留下任何印记。通过

对天空进行系统检测，天体物理学家发现大多数粒子的轨迹都在银河的银盘内，也就是说它们来自我们银河内部的邻居。然而，很多最高能的粒子，等概率地从不同方向袭来，也证明其中至少有一些来自于宇宙更深处。不过所有这些粒子都可以证明一点，我们身边的那些星球正在经历着新生、存续或死亡，就像原子自身也会命运无常、终有一死一样。

太阳风和地磁场会让大多数高速飞行的粒子在抵达大气层之前发生转向，但并非所有粒子都如此。物理学家尼泊尔·拉梅什（Nepal Ramesh）和他的同事们估算，每一分钟，高层大气的每一平方米范围都将遭遇一千次宇宙粒子的袭击。这样一颗粒子撞击到地球——当然这是异常小概率的事件——会发生什么？如果它和大部分粒子一样，一头撞向你头顶上方10英里（16千米）处的某个空气分子上，那么它会制造一场介子和其他亚原子粒子形成的“天空淋浴”，光探测器的黑色底片上会因此留下灰白色的荧光斑点，在没有月光的晴夜记录下它们的踪迹。这些粒子可以留下一条由凝结水滴构成的蛛网状细长轨迹，有助于云层的形成，或者它也可能会穿过你的皮肤，引起细胞损伤、癌变、基因变异，或者仅仅是继续向下深深地钻入地面。

你的家乡海拔高度越高，空气保护层就会越稀薄，由此带来的辐射剂量也会更大。根据美国环境保护局的在线测算器，当你乘坐一架喷气式飞机在纽约和洛杉矶之间往返一趟，会让你暴露于5毫雷姆的宇宙辐射强度之下，相当于一次X射线胸透一半的剂量。上述数据来源还可以查到，居住于海拔1英里（1.6千米）高的丹佛人，每年遭受的辐射量（45～55毫雷姆）大约两倍于居住在低海拔地区的旧金山人。拉梅什的研究发现，相比之下，海拔高度1英里的位置上，介子强度接近海平面上的100倍。他们测算显示，在加州，海拔4200英尺（1280米）高的位置上，每分钟每平方厘米会遭到100次介子攻击，也就是说，当你翻山越岭时，每秒钟都会有超过100个介子打到脸上。不管你会撞到多少个，这都是我们所有人都要面临的一大风险。天然背景辐射可以造成伤害，却也可以通过基因变异“创造”[此处加引号，避免理解成宗教意义中的创造]新的物种，这也是物种演化过程中的关键因素。我们的原子不仅来自于早已死去的星球以及宇宙开端的那次“大爆炸”：远方的超新星及黑洞如今依旧在对地球上的生物进行着元素改造。

如果你时常关注空间科学，你应当曾经听说过宇宙射线。然而，在和它们有关的“天空淋浴”和细胞破坏结束之后，它们又去了哪里？即便是经历了最为梦幻的冲撞之后，物质与能量都不会凭空产生或消失，只不过是相互转化而已，而无休止的空间宇宙射线风暴就如同是撞上挡风玻璃的昆虫一样，不断袭击着快速飞行的地球。这些粒子到底怎么样了？它们还和我们在一起吗？

你一定会很惊诧，你体内一些相对年轻的碳原子其实就是这种撞击的产物。当太空质子撞到外层大气时，它或许会引发一系列的弹性碰撞，最终驱使一颗杂散中子撞入氮原子核，氮原子因此转变成放射性的碳14，并很快与氧原子结合，成为二氧化碳混到下层。在每一平方码（0.84平方米）区域的天空中，每秒钟都有数千个碳原子通过这种方法形成，一旦落到地面后，便会被植物吸收并进入食物链，最终到达你的体内。

碳14原子中过重的原子核并不稳定，最终还将分裂出一些亚原子碎片，并转变成原先的氮原子形式。对于任何单一的碳14原子而言，你永远不可能知道它会在什么时候发生这样的衰变，但对于大量放射性碳原子而言，平均每5730年都会有一半发生衰变。这种变化随时都会发生。如果构建你DNA链的其中一个碳14出现衰变，由此形成的氮原子以及粒子辐射的反冲作用，都可能会造成基因编码的错误，如果不被修复便会出现变异。艾萨克·阿西莫夫曾经估测，成年人体内每秒钟都有大约3000个放射性碳原子会像微型炸弹般炸裂。

作为原子武器遗产的继承人，你体内的放射性碳也比你那些核时代前的祖先更多，并且在过去的这半个世纪中，这些残余污染或许已经导致了无以计数的生育缺陷及肿瘤。当你去谈生意的时候，放射性碳也会在你的全身爆炸，就如同是宇宙射线淋浴和冷战核爆的回音，将你和太空深处及核危机阴云联系起来。

你体内的一些水分子也是宇宙“炸弹”。有时对氮原子的撞击会产生氚，一种含有两个中子和一个质子的放射性氢同位素。当你游泳时，或是在阴雨天任由水分子滑过你的发丝时，含有氚的水并不会特别危险，但在你的体内，相比于丰度更高的放射性碳，辐射相对较弱的氚却可能

造成更严重的损伤。根据阿西莫夫的估计，人体内平均每秒钟会发生三次氚原子衰变。与此同时，空气中遭遇撞击的氮原子会变成碳12，也就是普通形式的稳定碳同位素。由于它们与构建你身体的大部分碳原子相同，因此也就没有办法精确地知道，你身体中哪些碳原子更古老，哪些又是宇宙孕育的“新生儿”，不过可以肯定的是，你体内一定也带着一些这样的变形体。

空间粒子撞击到裸露的岩石表面时，矿物质原子会被转变为放射性较为温和的氯同位素，或许会进一步溶解到地下水中并最终抵达你的沙拉。这种撞击一直在持续，因此地质学家可以通过样品中的同位素碎片测定冰川漂砾暴露在外的年限——反过来这也有助于校准冰川期的历史。随着岩石发生风化并将它们的原子送入海洋，这些因辐射而产生的氯原子也与地球土生土长的元素混在了一起，所以你的调料瓶与血液中也会含有这些宇宙来客的遗骸。可见，你不仅从生理上关联着你的地球老家——你的原子邻居也遍布整个银河系，甚至也包括宇宙的更深处。

太阳风中的电离态原子核，钾40和岩石土壤中其他一些不稳定原子的衰变，还有彗星与陨石的碎片，构成了一座粒子乐园，而你将发现一个完全不同于我们想象中的奇异世界。你和你的周围环境会时不时悄无声息地遭遇这些宇宙来客，和放射性爆炸物一同嘶嘶作响，在遥远星体的能量激发下发光。与此同时，大气层会逐渐因为太阳风的撕扯而消散。大气层之所以还能被稳定维持，是因为有地磁场的保护，也是因为火山与生物活动在对其进行补充。最邪恶的太阳风也未能威胁到你的空气补给，但这只是暂时的——几十亿年后，垂死的太阳将会更为激烈地释放剩余能量，将地球大气全部撕去，并随后毁灭整个地球。

当如此多的剧变在这么多层面上发生之时，没有哪种物质可以做到永恒存续。当进入你身体中的物质流最终变慢或停滞了足够久，你这个短暂存在的原子聚集体就如同一座村镇，只会单向地向大城市迁徙。人类、文明、物种甚至行星与恒星，最终都将会灭亡，只剩下它们的原子走向更深邃的时空终点。不过我们还是说说从现在到永恒之间更短的时间跨度吧，具体一点就是：当你死去时，你的原子会如何？

当你死去时，你的原子会如何

英国葬礼仪式中有一句悼词："尘归尘兮土归土。"而这句著名的悼词来源于圣经中的一句话："你本是尘土，仍要归于尘土。"以及"我使火从你中间发出，烧灭你，使你在所有观看的人眼前变为地上的炉灰"。这些说法是为了慰藉亡灵，并非是从生物与化学的角度解释，写下这些句子的人对碳原子与共价键也是一无所知，当然他们也不需要知道我们是由无生命的物质构成的。

你当然可以随心所欲地讨论神学和哲学，但至今为止没有任何被普遍接受的观点可以说明灵魂是什么或是当你死去时"你"发生了什么变化，或许永远也不会有。不过倒是有一些确定的科学事实可以让你足够信任，并在原子层面上阐述你的信仰与传统的基础。

简单来说，你身体中的大部分最终都将变成气体而非尘土，也就是由二氧化碳和水蒸气构成的看不见的"元气"（spirit），而这个词的意义源自于拉丁语"呼吸"（spiritus）。在我们深入探讨之前，不妨暂停思考一下，有1/3到一半的美国人相信形而上学的"元气"，那么原子性质对他们有何意义？

很多世俗观念都认为，人在死亡的那一刻，正是灵魂离开肉体的时候，然而这一说法并没有可信的证据支持。2007年，softpedia网站上由科学编辑卢锡安·多内亚努（Lucian　Dorneanu）撰写的一篇文章对此进行了解释：即便你能不择手段地成为一个会穿墙术的古典鬼魂，你也做不到你所期望的那样。比如说，因为你的脚是非物质的，也就不会与地面之间产生摩擦力，所以你并不能行走，而且你可能也不会被别人看到，因为你缺乏可以反射光线的原子。如果你的魂魄不是由原子物质构成，那么还可以假设它是一种能量，因此不具备密度或惯性，也就不能操控物体或是让空气分子产生运动，用抑扬顿挫的音波进行演说，或是发出令人毛骨悚然的鬼哭。而且，一般假想出来的鬼魂形象都会穿有衣服，但我们所穿的织造品似乎也不可能变成幽灵。的确，科学并不能证明鬼魂绝对不存在，但原子性质却至少可以说明，鬼魂不会像大多数恐

怖电影和小说中描述的那样。

如果你还想知道关于人体腐烂的一些血淋淋的细节，我们还可以转到其他一些可能令人不安的话题，然后你还可以读读一些法医专家的文章，而他们工作的地点则是像田纳西大学位于诺克斯维尔附近的“尸体农场”，在这里尸体被直接暴露在外以供科学研究。简单来说，即便你在死后经过防腐处理并被埋在一副结实的棺材中，你的原子最终也仍然会消散。不过在其他一些条件下，这个过程可以更快更彻底地发生，所以基于洁净的考虑，不妨用火葬代替这一过程，开启我们的思维旅行。

当你由生入死后，你的细胞将会缺氧并开始窒息。作为结果，你的线粒体会停止制造ATP，肌肉纤维不能再收缩，神经系统中的离子泵也没了能量供给。尽管在显微镜下，你刚刚死去的细胞看上去还是活着的，那是因为水质内部粒子的布朗运动还会让细胞持续翻腾，但是在原子层面，运动本身并不见得就代表着生命存在。

在现代火化炉中，原子会在1400～1800华氏度（760～982摄氏度）的高温下跳跃，让一切变得更为迅捷。几分钟内，你体内流淌的水分子就会因为剧烈运动，不再被氢键所束缚。当它们各自弹开后，便以蒸气形式逃逸到了空气中。

当你的水分逐渐离你而去，脱水的遗骸继续被加热，运动越来越剧烈的碳原子也将变得想要逃离，不过这个过程还需要些帮助。当蛋白质和其他一些有机物分解成炭黑时，这些黑色颗粒会因为断裂的化学键与热运动产生的巨大能量开始发光。空气中的“天使”——氧气会将你的碳原子悉数带走，为它们装上翅膀形成CO2飞到天空中。随着这些氧原子护卫的加入，你身体中的碳原子变成三倍多重量的气体，平均一名成年人可以产生超过100磅（45千克）稀疏分散的二氧化碳。通过类似的方式，氢、硫和氮原子也将以水蒸气及气态氧化物的形式从你的蛋白质与体脂中逃离。

跟着这些气体一同爬上烟囱，可以看到你身体最后的原子其他一些重组结构。胃酸中的很多氯原子将会再一次形成腐蚀性的烟雾，就像它们很久以前从火山口喷发的那样。如果你生前曾用传统方法补过牙齿，那么银汞合金中的汞原子也将松动并逸出，我们希望在给其他人的细胞

造成损伤之前，它们可以被过滤器捕获收集。如果你在美国死去，你的填充物产生的汞蒸气真的有可能威胁他人的健康，因为目前没有任何一条联邦法令对此进行约束。尽管很难确定可靠数据，但对全美的估算，每年因火化造成的汞排放量在数百磅到数吨之间。

在火化炉中待上几个小时之后，你先前从空气中获取的原子都将离去，剩下那些从岩石与土壤中获取的原子。这些骨灰，是你骨骼中刨去那些可燃胶质之后所剩无几的矿物质晶体碎屑，以及少量盐分和铁锈的粉末，除非你还在体内携带着其他物件。尽管为了谨慎处置此事，殡葬行业进行了很多努力，然而火化过程还是偶尔会遭遇因心脏起搏器或硅胶移植体引起的爆炸，最终，任何从猎枪子弹到金属假肢铆钉之类的物品都会在火化完成之后，化为熔炉底板的一部分。

当火葬场的员工向你的家人移交你那剩余的4～7磅（1.8～3.2千克）骨灰时，要知道，这些粉末与壁炉或营火产生的灰烬并不相同。柴火灰烬主要是钙与钾的碳酸盐（相对低温时）或钙与镁的氧化物（相对高温时）。相比之下，你的骨灰主要由骨骼中的磷酸钙构成，此外还有点钠与钾的盐末。躺在骨灰盒中的骨灰之所以呈细颗粒状，并不是因为它们叫“骨灰”，而是因为它们是被粉碎成沙粒大小以便携带，或许也是为了避免家人因为看到更大块的骨骼时引发的微妙情绪。

这便是关于你身体的全部。你的大多数原子将飘散在空中，而剩下的那些，将取决于你的“骨灰”守护人如何处置。故事到此为止了吗？很难讲。对于这些原子来说，你的死并不会让它们终结，只不过是让它们从几十亿年前就开启的史诗般传奇又翻过新的一页，而故事还将持续很久很久。

你的死亡并不是原子的终结

那些火化时产生的水和二氧化碳，会随着风到达地球的任意角落。如果你是在中纬度的位置火化，下降气流通常是向东前行，而如果你的生命终结在赤道附近，则更多会是向西飘散。这些地理信息，再加上大气科学家的努力，让我们可以想象如何跟随你的原子开启它们在你死后的旅程。

我们假设你和1955年时的爱因斯坦一样，在新泽西的特伦顿火化。与爱因斯坦一样，你身体中气化的那些残余物将很可能化作一道青烟，飘过北大西洋上空，确切的路线与流速则取决于天气和海拔高度。不过如果你只是满足于一般估计，那么可以天马行空地遐想接下来的过程。

大气中在空气最为密集的下层10英里（16千米）厚度中，地面平均风速一般在5～10英里/小时（8～16千米/小时）之间；随着海拔提升，风速也会显著加强。在新泽西所处的纬度，地球周长大约为19000英里（30600千米），按照平均风速为50英里/小时（80千米/小时）的合理估计，你的水蒸气和CO2将会在16天内环绕北半球一圈，考虑到风带中的湍流也许会接近三周的时间。在它们第一圈环游世界时，大多数原子并不会与能够吸收它们的水体或植物接触，任何人想在你被火化之后跟你的碳原子打招呼，只需要等上几周，向头顶上的空气挥挥手就可以了，尽管这些残余物很稀薄。不过，通常大气中水蒸气的逗留时间不会超过两周，所以你的大部分水分子应该已经凝聚成雨雪，或是成为沿途云层中的水滴了。

当它们绕地球三圈之后，你的这些气化原子还剩下多少依旧会从观察者眼前通过呢？北半球的表面积大约有9800万平方英里（2.54亿平方千米），因此如果你的碳原子均匀地分布于此，那么在任意时刻，每平方英里上空都将飘浮着1000亿亿个这样的原子；或者说，在头顶上方每平方英尺截面的空气柱中，都有3600亿个碳原子曾属于你。因此，在你火化后几个月后，如果有人抬头望望天空，那么在他的视野范围内将可能搜索到你的几万亿颗碳原子，尽管它们并不可见。如果再等上几周，

细菌将你那些氧化后的氮原子转化成光散射性的氮气，那么他们也可以想象，你也正在给天空增添一抹蓝色。

在此之后，你的气化分子又将何去何从？它们的原子最终会被编织到树木之中，或是在一些森林中以氧气的形式释放，除非在你的某位后裔体内才会再次转化为代谢水。也有一部分原子会被宇宙和太阳辐射撕裂。一些飞到大气层最上方的氢原子也许会被太阳风吹散到太空中，在那里它们会被离子化并加速，某种意义上讲，它们被遥远星系的宇宙射线“狙击手”再次发射。

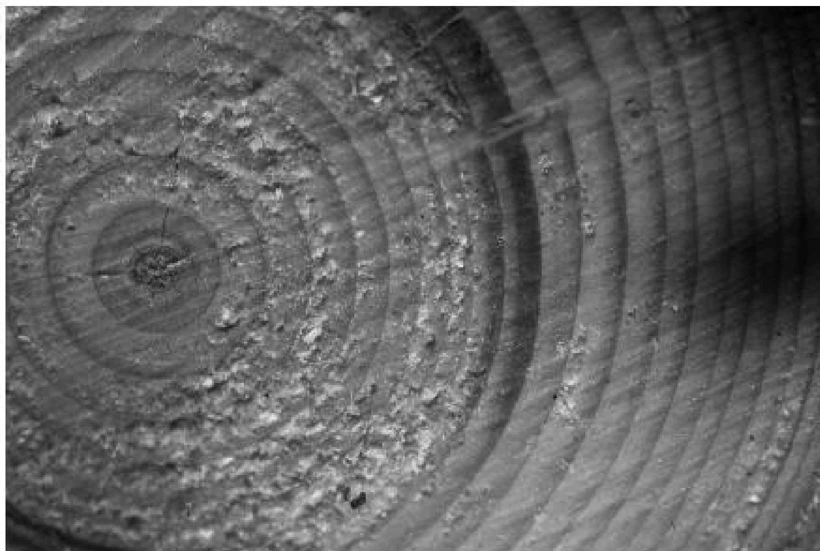
几周内，你的大部分残余水分子会凝聚并降落。如果它们掉落到海洋中，也许会和邻近的分子进行原子交换，不再是原本的状态。不过，在被海藻及蓝藻分解或被蒸发然后落到某处陆地之前，大多数氢氧原子都会持续跳着这支“水分子交谊舞”。在接下来的几百万年里，它们还会以无数形式出现在这个世界上，或许是树莓汁，或许是海龟泪。

至于你那些飘在空中的碳原子，最终也会溶解在雨滴中，并落到陆地上和海洋里，或是被植物直接从空气中吸收。落在陆地上的二氧化碳也许会被切断它们的氧原子双翼，并成为植物中有机分子的一部分，再被动物吸收，最后或许成为你后代的一部分。更多的可能是掉落在海洋中，海藻也许会将它们收集。这些海上漂泊者，很多最终都会成为鱼、鲸和鸟类的食物，而当它们成为排泄物或是从皮肤上脱落后，又被细菌奉若珍宝。在更长远的未来，它们中的一部分会沉入海底，被淤泥所覆盖。再过数百万年，它们也许会随着海洋中的俯冲板块向地幔中滑落，在剧烈的高温高压下，它们中的一部分也许会结晶为钻石。

假如你相信网络上的广告，那么你的一些碳原子也许可以更快地成为钻石。如果你的亲属希望如此，他们可以找到一大堆公司提供这种将骨灰碳压制成人工钻石的服务。网上的说明很简单：将骨灰与加工费寄给他们，经过几个月的秘密加工，就可以获得具有纪念意义的可爱宝石了。如果你的骨灰在相对较低的温度下形成，那么骨骼中残余的碳原子与烧焦的碳应该确实足够制造一颗钻石。不过质疑的声音也指出，骨灰中的残余碳原子相当缺乏，并且如果在死者亲人最脆弱的时候收了钱财，过几个月寄过去一颗网购的低廉钻石也是很容易做到的。

如果你真想留下一个美丽的“碳”回忆——其实你已经做到了，并且不用花一分钱。在你的一生中，你会通过呼吸、死皮和其他形式脱落碳原子，积累起来的重量远远超过你现在的体重。你的碳原子早已遍迹全球，从你出生之后，它们在羽毛、鱼鳍或花瓣——以及我们需要理性面对的粪便——之中待过，总之千型百态。实际上，你所爱的人到过的任何地方，都可能会让他们亲近你曾经拥有过的碳原子，其中一部分甚至已经在他们体内定居。不过如果你需要更集中、专一而稳定地记录自己的轨迹，树干上的沉积物会是一个不错的选择。

如果一棵树在你久居的地方生长，那么在过去的生长季节里，它将很可能吸收了一些你呼出的碳原子并将其编织到了树干之中。很多树都会生长同心圆形状的年轮，因此确定树干中哪些部分含有曾经由你呼出的原子也不是没有可能。如果一棵树生长在你家附近或是在你经常走过的林间小道边，那么你和它接触的时间越近，你的碳原子也会更靠近树皮。树干保存着这些和人类活动有关的原子，这可不是神秘的猜想，而是一个事实，可以通过对那些生长于大城市CO2穹顶之中或下风口的树木年轮进行同位素分析进行确认，可以根据全世界范围的树木年轮中存在炸弹来源的碳进行确认，也可以通过鲑鱼氮掺入太平洋沿岸植物的类似过程进行确认。



每一棵木本树的年轮中都含有碳原子，它们来自叶片在连续的生长季中所吸收的 CO_2。如果你在这棵树旁生活了很久，那么你先前自己的一些碳原子也可能已经嵌入了这些年轮中。照片由科特·施塔格拍摄

身体组织中碳同位素的动态平衡同样也显示，在你的一生中，你一直都在向环境中扩散。随着时间变化，食物中碳13与碳14同位素会越来越少，而你的碳原子会持续不断地通过食物更新，因此随着你不断“丧失自我”，你自己的同位素平衡也会在你的一生中发生变化。几乎你的所有原子都会在一年内被替换，而火化的一个主要区别就是一次性地将你消散，或许，活着的身体与腐烂的尸体之间，最大的差异并非是原子的离去，而是没有新的原子补充。

那么所谓的骨灰又如何了呢？这首先取决于它们会去往何方。如果有人将它们撒到田地或花园中，那么你的矿物质元素将很可能被植物的根部吸收。比如爱因斯坦，传说他的家人和朋友将他的骨灰撒在了特伦顿附近的一条河中，所以大西洋是他可能的目的地。河水的湍流以及弱酸性有助于将这些骨灰溶解，而当他的原子扩散到海水中时，海藻利用他的磷和铁构建细胞膜与线粒体，蛤与螺将他的钙吸收到外壳中。任何不被溶解的部分都已被沉淀所覆盖，未来还会像卡罗来纳海岸那样形成

沉积的磷酸盐，也许墨西哥湾洋流还会将爱因斯坦牙齿上的一些磷原子送回他的出生地，在那里它们第一次从德国某个农场的矿物质母体中出现。

思考有关死亡的太多细节很难，要接受上述过程不是幻想而是事实，或许就会更难。不过，科学关注的只是事实，不管我们更愿意相信什么，如果要说什么是放之四海皆准的道理，那么你可以确信一点：死亡会带走你的原子。也正因此，无数生物还会在未来繁衍生息。想到此，我们不禁想知道——未来到底有多远，有什么东西是永恒的吗？

任何物质都不会永恒，但你却一直都在

人类心理中更为尴尬的一个方面是，我们知道在不能永生的问题上，人类并不是唯一的，于是总是倾向于通过这一点寻求安慰。根据世界卫生组织测算，2005年大约有5800万人死亡，其中2/3是因为衰老，随着世界人口的增长，每年的死亡人数也会递增。是的，没有人可以逃脱死亡，不过知道人必有一死，也许可以让我们不会对此过于痛苦。

知道这一点也有助于明白：非生命状态是常态，即便对你来说也是一样。想一想：当《独立宣言》在费城被签署的时候，你身在何处？当罗马帝国衰亡之时，你又在何处？在过去的138亿年中，你都是“死亡”的状态，直到最近这短短的数十年。因此从统计意义上讲，生存显然比死亡偶然多了。

如果让新生儿背负你的“遗产”，你是否就逃避死亡了呢？其实也不会长久。平均来讲，你的女儿或儿子携带的基因中，也不过只有一半来自于你，到了孙辈就只剩1/4了，按族谱延续下去，“带有你的基因”不过只是个修辞手法罢了。你不过向受精卵贡献了一半染色体，而你的任意一个后代体内的上万亿组基因都只是从受精卵中最初的那一组获得的分子复制品而已。而且不要忘了还有宇宙射线、放射源以及其他各类诱导突变的物质。基因会随着时间变化，这也就是你为什么是你而不再是阿米巴原虫。

没有了你，生命现象还会延续，但也不是永远。你可以把你认为永恒的事物列个清单，而原子观点却可以说明其中没有任何一样是真正永恒的。

想象一下当你死去以后，世界会有什么变化？生老病死的故事延续了何止千万年，而变化依旧在发生着。所有我们熟悉的地貌最终都将因为抬升、下沉或风化而消失。大陆会碰撞，海洋会闭合或重生，新的山脉也会发育或消亡，物种也是如此。你如今所能看到的大多数原子——你周围的面孔、景点或生物——在未来的世界里都将继续在生存与死亡

之间徘徊。甚至连看上去永生的地球以及构建它的原子，最终在更遥远的未来也难逃厄运。

如今供养着我们的太阳，最终将膨胀成一颗红巨星。当它膨胀之时，作为反应，地球上原子的热运动也会跟着加速。从现在算起大约10亿年后，太阳会增亮大约10%，导致水分子的热运动过于剧烈，不能像如今这般稳定凝聚。缺乏足够的降水，海洋将会逐步蒸发，进入日渐湿热的大气中。而在从现在之后的大约30亿年，太阳会更加明亮，水分子将只能以蒸气状态存在，就像如今的金星那样。浮游生物不再能够生产氧气，而植物也会因为雨水匮乏，温度攀升，以及厚重的云层而灭亡。没有了原子营养源的基本供给，动物也随之灭亡，只留下地下的细菌伺机而动，直到地球上的环境不再能够满足任何生命生存。

当那一天来临时，这颗星球上的生命轨迹可以在时间轴上描绘成一个锥形的波峰，由各种原始细菌构成的薄薄边缘起源于40亿年前，多样化物种构成的高峰持续了大约20亿年，最后日渐衰落，还是终止于微生物。你的生命出现在“生命高峰”的中部。在你短暂的生命之后很久，也就是50亿到60亿年后会迎来一个更有决定性的终点，垂死的太阳最终会把你的原子——当然还有我们其他每个人的——吹向太空。

不过即便到了那时，在太阳消亡的内核冷却，地球被彻底驱散之后很久，你大多数原子的原子核仍然会存续。它们将以星云的形式扩散到星际之间的太空，就像太阳系形成前的那样。很多原子会失去电子，但其他还有很多会逗留在尘埃中的飘浮颗粒中。对于那时的氢原子而言，它们在地球上所待的时间，差不多占它们诞生后的一半。几十亿年后，它们中的一部分也许会被银河系中的某个星球俘获，也许同时还有你的其他元素。如果这些星球足够巨大，可以让它们发生聚变，那么这也就意味着它们走向了终结，即便到了那个时候，多数亚原子粒子仍然会延续，只不过换了种新的原子核组合方式。

而这些也将会消逝。最终，整个宇宙会因为没有足够的氢原子而不能引发新的恒星聚变，剩余的星球会一个接一个地被烧尽，宇宙也将慢慢变得黑暗。宇宙学家将我们在地球上的岁月定位在“多星年代”中，这是大爆炸之后的一场烟火盛会，我们身边随处都是爆开的宇宙光弹。不

过即便这一漫长的时代，对于整个时间跨度而言，仍只是很短的一瞬间。当最后的恒星燃料也被消耗殆尽后，宇宙还会持续膨胀，粒子内不断扩张的间隙会让你的原子孤独地飘散在茫茫黑暗之中。

如果很多宇宙学家最新的这些猜测是正确的，那么在数万亿年后，所有残留的原子都将停止它们的热运动，熵带来最后的终点，宇宙亡于热寂。随着它们的能量逐渐消散，如今构成你身体的那些原子——是的，包括所有的原子——都将化作相对论所描述的，由亚原子弦和夸克构成的雾。

所以可以看到，不仅是你自己将会湮没，就连构成你的那些原子也不能幸免。不过你自己的物质和你的世界无法避免的剥离也揭示了很多其他事实，看起来似乎有些矛盾，但也许会给你带来一丝慰藉。

任何物质都不会永恒，但你却一直都在。

你的身体以及世界上的其他物体都由原子构成，这些“物质”飘浮在时空之中，也就是爱因斯坦所说的四维矩阵中。当物质与能量伴随着宇宙衰老而消散，什么都不再存在，什么都不再发生，只有空无一物的状态会永远持续，在毫无特点的时空中冻结。

不过如果你渴望不朽，你也许可以用心领会爱因斯坦的物理观。时间中的位置和空间中的位置一样真实，即便在宇宙的历史中，你只是通过一场单向的时间旅程简单地造访了一下。你生命的一瞬间会永远地在时空中定格，如同宇宙诞生之日起每个人的生命与经历以及其他所有物质那样。

尽管有些时候，不近人情的科学与个人层面的情感或意图并不相容，但没有什么事情可以偏离事实。如果你的世界观符合物理事实，那么即便看上去很可怕的观点，有时也会带来鼓舞与安慰。如果你对我的话有所质疑，那么或许亚伦·弗里曼（Aaron Freeman）可以说服你。

弗里曼不是一位疯狂的“冷血科学家”，而是一名电台主播、喜剧演员和剧作家，所以他的人文头衔还是可靠的。最近，他在网上撰写的一篇文章流传很广，深受科学家和普通民众喜爱，我将在此与你分享其中

一段。

“你需要一名物理学家在你的葬礼上致悼词。”他如是写道：

你需要一位物理学家和你那悲伤的家人谈谈能量守恒原理，这样他们将会理解，你的能量从未死去。你需要一位物理学家提醒你那正在啜泣的母亲，热力学第一定律早已告诉我们，能量不会凭空产生也不会凭空消失。你要让你的母亲明白，她心爱的孩子将所有能量，每一次原子振动、每一大卡热量，以及每个粒子的每一次波动，都留在了这个世界上陪伴着她。

顺着这个思路弗里曼继续提出：“那些曾经在你脸上弹跳的光子，那些曾被你的笑容改变路径的粒子，那些拂过你头发的无数粒子，早已像孩子般远去，但它们的轨迹却因为你永远地发生了改变。”

他解释道，从这方面说，你所爱的人未必需要单纯依赖信仰，因为这背后的科学精确而不矛盾，也是可以被证实的。

随后他满怀希望地总结，你的家人将会“因为知道你的能量依旧存在于左右而得到安慰。根据能量守恒定律，你的任何一点都未消失，只是不那么有序了而已”。

当死亡的残酷事实打击了你或你所爱的人时，这样的观点或许可以缓和气氛，或许于事无补，但至少它们可以帮助我们建立对客观事实的合理认知。死亡揭示我们真实的原子自我，就像我们其实是古老而奇妙的粒子宇宙中无比微末而又无比珍贵的一部分，我们短暂地存在于斯，我们的身形和经验产生于斯，最终也将消散于斯——只不过是时间问题。

后记　爱因斯坦和他的阿迪朗达克山脉

当呼吸凝结成冰晶悄悄落到地面时，西伯利亚人坚信这是星星在低语。

——戴维·希普勒（David Shipler，《纽约时报》记者）

我们能够拥有的最美好体验就是神秘感——这是诞生艺术与科学的摇篮中一份必不可少的情感。

——阿尔伯特·爱因斯坦

在我出生的前一年，阿尔伯特·爱因斯坦离开了人世。1955年4月，他拒绝对动脉瘤破裂进行外科手术，并强调："人为延长生命毫无意义。我已经完成了分内工作，现在是时候离开了。"

尽管从未见过他，但和很多人一样，我总感觉和他之间有着某种联系。他改变了我们对自身和宇宙的理解方式，并且虽说他的很多前辈与同辈也充实了我们的知识体系，我还是认为他是将人类带入原子王国最具决定性的那个人。

撇开我们共享的这些智力遗产不说，我和爱因斯坦还有一些其他的

共同点，这也是我自己在撰写本书期间查找背景资料前才了解到的：他和我都熟悉纽约上州的阿迪朗达克山脉，并且都钟爱此地。

很多有关爱因斯坦的形象都是他在伏案工作或是在黑板前的回眸一笑，但其实他一有空就会去演奏小提琴、玩帆船或是尽情享受户外生活。他曾说："深入自然，那么你会可以更好地理解任何事。"他非常喜欢设计生动的思想实验，用加速的火车与变慢的时钟这些故事来解释他的相对论。关于原子王国的研究也是如此，不过却更为真实一些——我可以领着你前往阿迪朗达克山北部的萨拉纳克湖，那里是爱因斯坦生命中最后几年的避暑之地。毕竟，如果原子确实如他所证实的那样真实，那么它们存在的迹象也可以在野外被捕捉到，如同在物理学家的实验室中或是天文学家所说的遥远超新星上那样。

对你而言，跟随爱因斯坦的隐居之旅也许只是停留在纸面上，但于我来说，这片湖泊以及它周围的原子环境真是再熟悉不过，因为我就住在那里向南几英里的路旁。

萨拉纳克湖边有个小镇。现在可以开始想象，我们驶离镇政府边的十字路口，穿过一座小桥后左转，顺着花湖（Lake Flower）的湖岸前行。富有历史感的木质房屋在水边林立，简朴而诱人，人们如今依然在这里驾着帆船穿过狭窄的花湖水道，就像七十多年前爱因斯坦曾经做过的那样。

沿着森林茂密的山道，经过长长的一段上坡之后就可以看到我们要寻找的地方了，一路堆满了表面刷有白漆的木料，多半是要用于装饰老式木屋。当我们接近前门时，一条狗友好地蹭了过来渴求我们抚摸。门是开着的，从里面飘出一阵香味，那是刚刚烘焙好的饼干散发出的独特芬芳。一位自称佩蒂的妇女迎上前来——这位资深烘焙师知悉爱因斯坦"避暑山庄"的一切故事。

"没错，就是这个地方！进来随便转转……"

佩蒂和她的丈夫迈克给我们展示了餐厅中木质壁炉上一根被点过的香烟。"我们非常确定这是他吸过的烟。"佩蒂信誓旦旦地说道。不过即便不是，爱因斯坦的气息还有皮肤角质的原子大概都已经深入到了这些

木纤维的毛细孔中，与如今这些居民融为了一体。

起居室很长，也很舒适，有座传统乡村式的壁炉，而硕大的窗户外，被硬木林覆盖的斜下坡尽收眼底。“倒退到1936年，那时，爱因斯坦和他的妻子可以从这里直接看到湖面，”迈克解释道，“如今树林都长起来了，景色也被挡住了。”从19世纪后期直到20世纪初，由于人工砍伐以及意外火灾，阿迪朗达克山区的大多数森林都不见了踪影。相比爱因斯坦度假的时期，如今萨拉纳克湖边的丘陵显得更为原生态了，也许只有屋子旁边最老的那些树干里才可能找出不少曾经属于他的碳原子。

佩蒂随后领着我们上楼。“卧室还是原封不动，不过盥洗室不是了。”几年前盥洗室重新装修时，当地几个年轻小伙儿把“爱因斯坦的马桶”抬了出去，埋在了树林里。她说：“这对他们来说是种特别的奖赏，直到现在他们依旧对马桶墓地所在的秘密地点守口如瓶。”

佩蒂确信，位于角落里正对公路的那间最小的卧室，就是爱因斯坦曾经居住过的。“他和艾尔莎一直分房睡，后面那间稍微大一些的卧室可能是她的，里面有个大衣柜。”

我记得我曾读过有关艾尔莎的书，我了解她是如何冲破近亲关系（他们是堂姐弟）的障碍，最终和这位被她称作“阿尔伯特儿”（相当于德语中的“小阿尔伯特”）的人结婚的，我也知道这位头发蓬乱的名流对婚姻的誓言很是淡漠。也许到了晚上他们都更喜欢拥有私人空间。尽管这也许不能反映这对著名夫妇私生活的所有细节，但还是可以推测这是由爱因斯坦麻烦不断的家庭关系引起的。艾尔莎一直饱受慢性疾病的折磨，出于休养和康复的需要，他们在1936年的夏天一同来到了萨拉纳克湖，但病魔还是在几个月后终结了她的生命。站在他们曾经的寓所里，很容易想象，艾尔莎的病痛恐怕也是让他们那时难以同房的原因吧。

房东一再跟我们说，我们可以随便待多久，不过现在没那么多时间了。

在此度假的第一个夏天，爱因斯坦在一个傍晚应邀前往诺尔伍德山庄赴宴，这是萨拉纳克湖畔一片幽静的树林，坐落在镇区西侧，艾尔莎离世后他还去过不少次。庄园的所有权属于一家由众多显赫家族构成的

俱乐部，其中就有环境保护学家罗伯特·马歇尔（Robert Marshall），他因为协助创立荒野保护协会而闻名于世。这里简直是休假者的天堂：美丽的山林风光，几间闲适的村舍依偎在主屋旁，还有一汪点缀着几座小岛的湖泊可供帆船游玩。马歇尔后来记录了他的贵客到达此地后的反应："我很少看到有人会像爱因斯坦教授一样，看到此地的自然环境后显得如此激动。他不停诉说着这里的人迹罕至，与主流的美国相比大不一样。"

黎明后不久，当我们从杜索码头划着独木舟启程，打破了犹如镜子一般平静的湖面，而这里也正是爱因斯坦经常泛舟的地方。水分子托举着我们，而它们正做着爱因斯坦笔下的"布朗运动"。然而不管它们如何振动，氢键还是顽强地将水分子牢牢扣在一起，因此重力作用可以将整片水域"熨"成波光粼粼的水平面。尽管如此，还是会有些水分子悄然脱离湖面上升，只会在晨雾中冷凝而现身，而远处沿岸馥郁的白皮松则向空气中释放了更多这样的水蒸气。当我们的桨划入厚厚的水中时，手心里的汗也在提醒着我们，我们的每一次呼吸，也有同样的一些分子正跳着舞从我们体内流出。

宽广的湖面倒映的，是我们头顶上的氮气分子在太阳风的激发下的散射出的蓝色。很难想象当年爱因斯坦驾着帆船，漂浮在这同一片天空与湖面之间时，他会不去思考这些问题，毕竟这还都是他对我们知识体系的贡献。当我们离诺尔伍德山庄越来越近时，空气中的氮分子拂过我们的发丝，像是在问候它们的那些氮原子亲戚。这些蛋白质终将从我们身体上脱落，解离出的氮原子会和爱因斯坦白发上掉落的其他原子一同混合在空气中。再后来，同样这些原子或许又会被化工业所捕获，那是爱因斯坦的朋友弗里茨·哈伯发明并优化的合成氨工艺。未来它们也许又抵达了某人身体里，而那人正划着桨，就像我们现在这样享受着"氮气蓝"的天空下清风拂发的惬意生活。

我们周围的湖面上出现了一些牛眼大的晕圈，过往云烟用一场短暂的细雨留下了它们的踪迹。雨水的嗞嗞撞击声提醒了我们，还有一场由宇宙粒子形成的阵雨也在洗礼着我们和这片湖面，这可不仅仅是将雨滴比喻成了原子。交通工具以及中西部各州火电厂燃煤排放的氮氧化物和硫氧化物也混入了这片湖泊，降低了它的pH值。除了湖泊河流，酸雨也

向周边森林里的食物链提供了氮源，将它们变成了“不洁森林”，和太平洋西北地区富含氮元素的鲑鱼森林倒是有几分相仿。作为本地草莓与鲑鱼的消费者，我头发中的蛋白质一定也含有部分这样的废气氮原子。然而，我更希望在中年之后逐渐稀疏的头发中，少一些这些污染物来源的氮原子，而是像一头老灰熊那样在毛发里带着些“舶来”之氮。

一只潜鸟在我们船舷前方探出头来，展示了它的战利品——一只鲈鱼，将其吞下后，它又再次潜入水中。上风方向遥远的火电站排放出的汞原子，此刻正从鱼的体内融入鸟的体内，也许会造成这只潜鸟越发慵懒，不愿去打理它的巢穴。这片森林的那些已变成化石的祖先，氧化之后游荡在我们和这些新生的森林之间，和那些从遥远海洋置换出的CO2同伴纠缠在一起。它们给这里每棵松树的每一根针叶都提供了额外的1/4碳原子红利，而当爱因斯坦第一次到达此处时，还不过只占1/10。

1945年8月上旬，当广岛与长崎被摧毁的新闻传到阿迪朗达克时，爱因斯坦正在诺尔伍德度假，和他的妹妹玛雅一起享受着帆船假期。在这个由E＝mc2证明的残酷事实中，不到一盎司的铀或钚完全转化为能量后，就可以夺走数万人的生命，《奥尔巴尼联合时报》（Albany Times Union）的记者理查德·路易斯（Richard Lewis）在8月11日驱车前往诺尔伍德，询问爱因斯坦对此作何反应。

在俱乐部负责人的协助下，当晚他最终在6号院见到了爱因斯坦，完成了独家即兴专访，而爱因斯坦当时已在全世界范围内拒绝了很多类似采访。在表达对原子弹轰炸的无奈之后，爱因斯坦告诉他：“在发展原子能的过程中，科学并没有创造出超自然的能量，只不过是模仿了太阳中的反应而已。原子能并不比我乘着帆船划过萨拉纳克湖这件事更不自然。”

爱因斯坦并没有直接参与核武器的研制。他是一位和平主义者，而且他也很怀疑，原子裂变产生的能量真是可控的。与他同时代的欧内斯特·卢瑟福（Ernest Rutherford）同样对核能持悲观态度，并声称：“原子裂变产生的能量少得可怜，将原子能作为能源无异于天方夜谭。”即便是相信核裂变可行的很多科学家们，也非常担忧，认为这过于危险不应该尝试。化学家弗朗西斯·阿斯顿（Francis Aston）在1922年的诺贝尔颁

奖典礼的演讲中说道：“这种能量何时能够实际应用虽然遥不可期，但值得我们一直去研究，一旦它们完全被解放，就会彻底不可控，巨大的威力将摧毁周边的一切物质。这样的事故会导致地球上的氢原子瞬间转化，而实验的成功之处就在于让宇宙中又多了一颗新星。”

不过1939年的时候，一位朋友告诉爱因斯坦，德国正在开发一种使用原子能的超级炸弹，于是他带着万分不情愿向罗斯福总统提议，催促他也开展同样的研究。不久后他便对这个决定感到后悔，并强烈反对进一步发展核武器。如果他活得更久一些，他或许还会继续抗议他和地球上其他所有人的身体都被铈137、碳14以及其他一些放射性同位素污染了，这些都是核爆试验在世人共享的大气圈中留下的遗迹。在阿迪朗达克湖泊中的湖床上也有一层富含铈的淤泥，对应的时间则是20世纪中叶，而我自己的科研中也利用这一全球性铈元素突跃对沉积物岩芯进行定标，只不过取材于遥远非洲的湖床。

当我们靠近诺尔伍德的船坞时，炽热的阳光从蓝色的天空深处照射过来。爱因斯坦一定也会暗自得意，因为他那著名的质能公式显得简单而优雅，也解释了这团令人目眩的火球。夏日里的阿迪朗达克，具有波粒二象性的光线火力全开，这些恒星之光的原子源头也被充分展现。我们之所以能看到湖泊、岛屿还有森林，多亏了这些因氢核聚变而产生的可见光能量，在触及我们的眼球之前，从这些物体上向四面八方发散。跟着光一同抵达的热量，引发了原子的热运动，而这一过程竟是如此精确，使得地球上的水可以固、液、气三相同时共存，无论北极点在冬季时如何背离太阳。

如果不用蘑菇云或涂鸦公式之类的事情去谈论爱因斯坦，公众还是更愿意将他和夜空联系在一起，也许是因为他关于时空一些广为人知的理论——当我们仰望星空时，光可以让我们看到历史。这些关于星空的讨论，可以勾勒出他在银河光辉之下思索黑洞的情形，然而他的一些有关物质与能量关系的观点，即便在白天的阿迪朗达克野外，也有着巨大的影响力。

简单地将“太阳”这个词替换成“恒星”，或许可以改变你对什么是真正田园风光的感受。当你平躺在温暖的甲板上时，一般感受是大火球“悬

挂在空中”，而非“在太空中和我们做邻居”。以这样一种水平视线观察，太阳就在眼前，这比它在头顶时更容易让你感受到，其实并没有什么用于支撑的基座或缆绳，于是你会发现，我们太阳系中普照万物的耀眼核心其实是飘浮在一片虚无之中，直接从千百万英里以外让你的原子跳起了舞蹈。同样，这颗岩石行星的引力让你的身体可以紧贴着地面，就像它对水分子的作用力那样。

在这样的位置可以更容易觉察到一颗由陆生原子构成的巨大球体，其柔和的曲面正带着你和萨拉纳克湖以接近声速的速度向东旋转。“白天”这个词更像是描述一个地区而非时间——一片可以看到太阳光穿过“氮气蓝”天空的区域。它掩盖了更多遥远恒星的光芒，只留下月球的反光面和邻近行星，当然还有像SN1054这样极为罕见的超新星。如果你等待得久一些，你和你的这片地区便会从蓝色迷雾滑落到可以更清晰欣赏太空暗井的区域，而这片太空一直从各个方向包围着你。

如果你能在此环境中哪怕待上片刻，你对这颗飘浮的行星彻底依赖的情绪会变得更加真实，然后也许还会更轻易地感激那些维系着你的原子，并理解你对它们的影响。就目前我们所知道的，只有地球上才有生命存在。只是存在就非常了不起了，更重要的是我们的数量还在不可避免地增长，我们以及我们的后代还将获得更多知识。

只有一点，不知道爱因斯坦是否对“非生命原子如何产生生命”这一悬而未决的问题有过思考。他承认人类的理解力会有极限，其中也包括他自己。1945年7月，他在6号院写下一封书信：“我们必须谦虚地赞美这个世界的和谐构造——仅限于我们所能掌控的程度。这就是一切。”自然选择的压力已经让我们的大脑足够聪明，可以保持呼吸和生育，但它们没有让我们变得全能，而且还有很多事情我们不能简单地装进脑袋里。仅仅依靠科学，我们努力掌控的世界也仅此而已，但有时科学与艺术的结合却可以带着我们探索旅程的剩余部分。作为一名音乐家，爱因斯坦很明白这一点，也许正是他对音乐的热爱，也曾将他的视野带到原子构建生命的方式，如今我们用“涌现”（emergence）来描述这一过程。

涌现现象是由一些相对简单的现象构成的，然而总体却大于个体之

和，就像随机的划痕可能构成字母一样；而通过改变排列顺序，字母也可能构成具有特定含义的词汇，比如字母e、l、f和i，可以构成“file”（文件）或“life”（生命）。在同样这些神秘地区，这些词汇又进一步涌现成文献，大量原子与分子便是如此构成了有生命的细胞。很多现象都与此类似：上千条鲦鱼可以形成起伏的银色波浪，上百万居民可以让一座城市变得独一无二，数十亿条珊瑚虫可以构建复杂而多彩的珊瑚礁，而数以兆亿计的无意识细胞可以构建出一片殖民地，像人一样行走、说话和思考。

前文提到的音乐，其实就是空气中声波的“涌现现象”，尽管不能完全依此解释生命起源，不过也能让描述生命的过程变得很惬意。爱因斯坦是位出色的小提琴手，尤其喜爱莫扎特的音乐，而且他声名远播，经常被国际上一些成就斐然的音乐家邀请作为嘉宾。钢琴家阿图尔·鲍尔萨姆（Artur Balsam）在被问起“相对论的作者音乐水平如何”这个问题时，答道：“他相当棒。”（He is relatively good.此处为文字游戏，相对论在英语中是relativity theory，而这里的回答则用了relatively这个词。——译注）

不过爱因斯坦对音乐的热爱更多是出于个人感情而非职业关系，而且虽说他可以拥有最优质的音乐器材，他却更愿意在一只陈旧的盒子里装着他那并不昂贵的小提琴，跟着他游东走西，其中也包括诺尔伍德。在6号院的阳台上，他经常一个人演奏，或是很享受地和小提琴演奏师弗朗西斯·马格内斯（Frances Magnes）进行二重奏，后者也是萨拉纳克湖的一位避暑常客。爱因斯坦曾经说过：“如果我不是物理学家，也许会成为音乐家……我用音乐看待我的人生。”

科学史作家亚瑟·米勒（Arthur Miller）曾如此描述爱因斯坦对莫扎特的爱慕之情：这是科学与艺术情感的完美混合。他写道：“自然法则的奥秘，正在等待着某个人去揭示，他有着一双可以被宇宙激起共鸣的耳朵。”物理与音乐一样，整个领域都包含着“呈现惊人对称性的预设和谐”，爱因斯坦对此有着深刻感悟并将其作为自己的财富。对他而言，莫扎特的音乐“似乎早已在宇宙中出现，只是等待着大师去发现”，这不禁让人想起米开朗基罗谈起他的雕塑时所说的话——他并没有创造人物形象，只是让本来沉睡于大理石中的他们从此解放而已。

关于生命的原子属性，音乐又能揭示什么呢？物理学家时常会将轨道电子的振动模式比作是乐器谐振弦的驻波，而且据说这些亚原子超弦的振动模式很像和弦，可以用小提琴演奏出来。不过根据量子力学理论，原子更难被测定，而音乐与生命对精确度的追求都非常苛刻。一些动物发出的声音究竟是歌声还是噪声？生物学家对此仍然争论不已。同样，即便是研究生命起源的科学家，也仍然没有确切的定义可以说明，生命本身究竟是什么？你也不妨自己试着解释一下，就跟我经常在生物学导论课上跟学生讲的那样。

在学生们列举了一大堆生命特征之后，其中包括饮食、呼吸、应激以及繁殖等，我从讲台背后了拿出一把事先藏好的链锯。他们下巴都被惊掉了，随后爆发出一阵笑声，而我从容地拉动链锯的拉绳，机器发出“生命”的咆哮。几乎之前列举的所有生命现象都在燃料的作用下产生了，包括废气的排放，还有对我触动开关的手指的刺耳反应。当我“杀死”这台机器时，总会有学生问：“慢着，还有繁殖呢？如果不能繁殖，可称不上是生命。”如你猜想的那样，总会有些粗鲁的回答紧接着就出现了：“那你说修女呢？难道修女也不是生命吗？”或者“骡子怎么办？再努力也下不出崽儿”。

定义生命就已是如此艰难，就更别提如何从原子起源的问题了，任我们怎么努力也无从答起。不过虽说我们不能完全解释生命是什么，分子共振涌现出的“音乐”还是可以帮助我们描述生命到底像什么。如果你现在打算借来爱因斯坦的小提琴——如今还经常被他的重孙保罗带到音乐厅演奏——并来到诺尔伍德的船坞演奏他最爱的莫扎特《e小调奏鸣曲》，想一想会发生什么？

这把特殊的乐器，其中大多数原子早在20世纪40年代就曾到访过此地，因为比起湖泊和演奏者这样的原子暂居对象而言，小提琴之类的物体中，原子可以待上更久的时间。但是，从你指尖和琴弓中传出来的音乐究竟是什么？

声音本身是一种空气分子撞击你耳膜形成的波，存续时间很短，而你对音高与声调的感知，来源于神经元离子形成的波，它们激发了你的感官与你大脑的情感反应。然而，旋律本身是因演奏而产生的一种抽象

模式，更彻底地说，是1778年诞生于莫扎特脑海中一些抒情的思想。《e小调奏鸣曲》的“涌现现象”，比任何音乐会或演奏家的生命都更持久，并且无论有没有乐器将其具象成声音，也无论是否在纸上记录下乐谱，它其实都是存在的。

也许这就是你与音乐的最相似之处——并不是你的原子构成了一把物质意义的“乐器”，而是它们像音乐那样通过内部相互作用“涌现”出了一种独一无二的排列。你真实存在，却又是一个抽象体。或许，你就好比是一个成功的原子乐队正在演奏的一段旋律，你的身体就是剧场，然而音乐会迟早都将落幕。沃特·惠特曼（Walt Whitman）在一首诗中曾多次表达过这样的态度：

我为自己喝彩，为自己歌唱；

我之所思，也将是你之所想；

因为我所拥有的每一颗原子，

都将成为属于你最好的给养。

如同奏鸣曲的声音那样，或是像莫扎特、爱因斯坦还有惠特曼那样，终有一天你也会离去。然而如同乐曲的抽象结构那般，时空坐标和你生命的涌现方式却将不朽，曾属于你的原子或是亚原子，都将在亿万年中不断变换形式继续存在，直到它们逐渐消散在那垂死的寂静宇宙之中。就像惠特曼所总结的：

我像空气一般离去，对着夕阳甩着我的白发；

我把肉体投进旋涡，让它在花径格栅间飘荡；

我把自己埋入泥土，期待在我爱的草间重生；

你若想再看我一眼，可在你的鞋底寻寻觅觅。

与此同时，欢迎回到原子的你（your atomic self）。氢原子经历了几十亿年的恒星聚变，又在地球上的气水土火之间跳过无数次原子之舞，终于变成了你，而你也会优雅地将它们馈赠给那些尚未出生的许多

生命。而当你的生命故事谢幕之时，你也会明智地跟宇宙一同分享你的物质与能量。

方便的话，再来一次呼吸吧——这不仅是因为你必须这么做，更是因为，你可以这么做！

注释

前言

氧原子的大小。氧原子的直径是60皮米，或者写作60×10^{-12}米（斯莱特，1964年），而对氧原子核的合理推测是，直径约为3飞米，即3×10^{-15}米，质子的直径大约为0.84飞米（玻尔等，2010年）。将原子核放大到树莓那么大，直径大约为1厘米，需要放大3.3×10^{12}倍，因此整个原子的直径就是$3.3 \times 10^{12} \times 60 \times 10^{-12}$米，即约200米。膨胀原子球的体积将会达到3350万立方米。大都会人寿体育馆的体积据说是180万立方米，大约只有膨胀后原子体积的1/18那么大。

纯原子核构成的指尖重量。多个数据库记录的原子核密度均为10^{17}kg/m3数量级（比如高等物理网http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/nuclear/nucuni.html）。指尖的体积大约有1立方厘米，也就是百万分之一立方米。因此全部由原子核构成的指尖大约有$10^{17} \times 10^{-6} = 1011$千克。每千克相当于2.2磅，因此如果换算下来，就是2200亿磅，或者是1.1亿美国标准吨。

第1章　生命之火——氧

对氧原子流经手臂的计算。氧原子的半径是60皮米，因此一个氧原子的直径是120皮米，或者说是120×10^{-12}米。如果原子尺度膨胀10^{10}倍，那么直径就是1.2米。为了简化计算，我们将人的身高也设定为这个数值（好像矮了一些），并同样扩大10^{10}倍。一般成年人的手臂差不多为0.6米，扩大同样系数之后就是0.6×10^{10}米，也就是600万千米。每千米的距离是0.62英里，换算之后就是3700万英里，如果让你1秒钟内完成这么长的旅程，那么你就需要远远超过光速，因为光速“只有”186282英里/秒。

爱因斯坦的相对论证明，这根本不可能实现。

关于细胞放大1000万倍成为一座高300英尺小山的计算。人类细胞的直径在10微米数量级，也就是10^{-5}米（丹尼尔等，1979年），因此将其放大1000万倍（10^7倍）后，将扩张到大约100米高。细胞内部的结构微丝直径为6～10纳米，也就是6×10^{-9}～10×10^{-9}米（福克斯与克里夫兰，1998年）。扩张107倍之后，它们有6～10厘米粗。线粒体的长度一般在0.5～10微米，也就是5×10^{-7} ~ 10-5米（克劳斯，2001年），放大后就是5～100米，与文中所比喻的拖拉机拖车大小相符。

第2章　原子之舞——氢

分子速度与碰撞率在线测算（高等物理，乔治亚州立大学物理与天文学院）：http://hyperphysics.phyastr.gsu.edu/hbase/kinetic/kintem.html#c3

IBM网站的“男孩和他的原子”：

http://www.research.ibm.com/articles/madewithatoms.shtml#fbid-yfOjFKDc8us

生理学网的扩散时间计算器：

http://www.physiologyweb.com/calculators/diffusion_time_calculator.html

第4章　生命之链——碳

1990-2005年USEPA统计的汞排放信息：

http://www.epa.gov/mats/powerplants.html

USEPA登记的女性及儿童汞含量信息：

http://www.epa.gov/hg/exposure.htm

USFDA登记的鱼类汞含量信息：

http://www.fda.gov/Food/FoodborneIllnessContaminants/Metals/ucm115644.htm

第5章　地球之泪——钠

北方咕噜舟蛾与人类对比（斯梅德利与艾斯纳，1996年）：雄蛾体重大约80毫克，可以一次连续吸取10～50毫升水。如果按40毫升计算，相当于是40000毫克水，也就是500倍于蛾子体重，换句话说，这些蛾子一次可以吸取相当于自身体重500倍的水。如果你的体重150磅，完成同样的壮举需要饮用75000磅水（150×500）。一加仑水是8.3磅，因此这就意味着你需要饮用9000加仑泥水。北方咕噜舟蛾的身体大约是1厘米长，但它可以将排出的水喷出40厘米远，也就是相当于体长的 40倍。如果你站起来有1.8米高，你体长的40倍就是72米。北方咕噜舟蛾可以一次收集17毫克钠离子，而一只雄蛾体内的总钠量大约有19毫克。因此，一只蛾子可以获取身体中钠供应量的绝大部分。成年人体内的钠含量大约有3.4盎司（弗雷塔斯，1998年），因此合理的估测是，一次摄取3盎司（85克）钠才能与它们相提并论。

第6章　生存，毁灭，和来自空气的面包——氮

关于散射与天空色彩的一些优秀网站：

迪特里希·查韦斯沙。“散射：天空的色彩。”

http://www.itp.unihannover.de/~zawischa/ITP/scattering.html

NOAA国家气象服务，激流——在线气象学校。“云的色彩”；

http://www.srh.noaa.gov/jetstream/clouds/color.htm

大气光学。“天空为何是蓝色？”

http://www.atoptics.co.uk/atoptics/blsky.htm

第8章　增长的极限——磷

人类DNA链总长：对人类细胞总数的最新推测是37万亿个（比安科妮等，2013年）。不过，红血球细胞并不含DNA，而且在身体中非常普遍。一名成年人通常会携带5升血液（你可以在easycalculation.com网站上输入性别、体重与身高等信息后进行测算），而每升人类血液中含

有大约5万亿个红细胞，也就是每微升就含有大约500万个细胞（梅奥医疗中心，2011年），这样算下来你还剩大约12万亿个带有DNA的细胞。根据多数数据库，每个细胞中的DNA大约有2米长，这是基于每个细胞中有两组各30亿段人类基因组碱基对的事实估测得到（安农齐亚托，2008年）。12万亿与2米相乘，可以得出240亿千米（2.4×10^{13}米）的结果，也就是150亿英里。冥王星轨道距离我们40亿到80亿千米，因此你的DNA总长可以覆盖这段旅程至少三遍。

游泳池里的沙粒：如果一个奥运会标准游泳池的尺寸是50米×25米×3米，那么也就可以得出其体积是3750立方米。如果沙粒呈立方体，边长是1毫米，那么其体积就是1立方毫米，而10亿立方毫米是1立方米。将3750与10亿相乘可以得到3.75万亿，也就是每个这样的游泳池可以装下3.75万亿颗这样的沙粒。如果你的体内有7000亿亿亿个原子（弗雷塔斯，2008年），你就可以用同样数目的沙粒填满2万亿个上述游泳池。每个游泳池的占地面积为50米×25米，那么所有游泳池的面积将覆盖大约1250平方米×2万亿，即25×10^{14}平方米，或者是25×10^{8}平方千米。地球的表面积大约是5×10^{8}平方千米，也就是说上述游泳池可以覆盖5个地球。

花去7000亿亿亿美元：每天有86400秒，每年就是3150万秒。如果每秒花去1百万，你每年可以花去31.5万亿美元。这样你就还需要再来222万亿年才能花去剩余的部分。现在的观点认为，目前宇宙中这种氢原子聚变，恒星不断产生的多星时代将会持续大约100万亿年（亚当斯与劳克林，1997年）。

大气中碳原子可供的人类规模。特伦伯斯与史密斯（2005年）测算大气的总质量为5.1×10^{18}千克，而2013年大气中二氧化碳的浓度为400ppm，相当于大约2×10^{15}千克，其中约四分之一是碳的重量，也就是50×10^{13}千克（5000亿吨）。弗雷塔斯（1998年）测算成年人的碳含量大约是16千克，因此大气中的总碳含量可以供应3.1×10^{13}个成年人使用（31万亿人口规模）。

第9章　消逝的肉体——生命和非生命的界限

火化后的气体性碳原子。一名成年人的身体中大约携带

8×10^{26}（800亿亿亿）个碳原子（弗雷塔斯，1998年）。如果在火化过程中，所有碳原子都转化成CO_2，并均匀分布在北半球的大气中（表面积为9800万平方英里），那么也就是（大约8×10^{26}到10^{27}个原子分布在108平方英里）每平方英里上方有10^{19}（1000亿亿）个碳原子。一平方英里是27878400平方英尺，因此北半球的每平方英尺上方就是3.6×10^{11}个碳原子，即3600亿。

致谢

我对原子的兴趣可以追溯到孩提时代，当时是为了完成六年级的一项家庭作业。感谢我的姐姐莱斯莉，从垃圾堆里捡出那篇论文，也感谢老师们当时的鼓励，让我对科学充满了热情，当然也要感谢在各方面给予我帮助的所有人。

感谢大卫·辛德勒提供了226号试验湖的照片，感谢苏克图·巴夫萨尔、克雷格·博伦、蒂姆·加内特、查理·芮、拉尔夫·基林、路易斯·马丁内利以及汤姆·莱莫什提供的信息及对文字部分的核实，还要感谢李·安·斯伯恩带我领略了直接呼吸纯氧的快感。感谢澳大利亚广播电台主持人理查德·费德勒邀请我用文字跟踪了他们一行周游世界时一股人类呼吸中的碳原子。也要感谢佩蒂和迈克·鲁特带我参观了爱因斯坦的旧居，感谢萨拉纳克湖历史保护区的大卫·比尔科波夫、艾米·卡特尼娅和玛丽·霍特琳，感谢萨拉纳克湖公共图书馆的彼得·本森与迈克·图科，感谢《阿迪朗达克日报》的彼得·克劳雷提供照片的同时还协助查询爱因斯坦在阿迪朗达克的历史脚步。感谢帕蒂·麦克唐纳关于毛发科学的指导与支持，还有汉斯·本齐格提供了他难以忘怀的照片，从而让我可以与你们分享食泪蛾的故事。感谢凯利·约翰逊、李·安·斯伯恩、克雷格·麦尔维斯基、劳拉·罗策、阿莎、杰、德沃拉·斯塔格、比尔、苏珊·斯维尼对手稿的阅读，并提供了许多宝贵的意见，从而让我看起来比实际更像一名成熟的作家。

衷心感谢我的合作者兼代理人桑迪·迪杰斯特拉，她的“桑德拉·迪杰斯特拉文献服务处”给了本书很大的支持与指导；感谢我的编辑彼得·约瑟夫，他非常优秀，当然还有托马斯杜恩书店与圣马丁出版社的其他全体员工，很专业地指导我对本书进行了多次修改与调整。国家科学基金会的大卫·维拉多以及我的“自然课题”团队成员，在北方公共广播工作的玛沙·弗雷与乔·赫德，让我成为更好的科学传播者。当然，还有我在保罗史密斯学院的学生和同事，在过去的25年里给了我莫大帮助。除了保罗史密斯学院的职员与董事以外，还要感谢很多为北郡中学付出大量心血

的很多人，是他们将这座位于山区湖间不起眼的小学校打造成了一座环境优美、声名远播的梦幻学园。当然不能忘记的还有我那了不起的太太凯莉，在这个项目的方方面面，睿智的她都给了我莫大支持，我的余生还将需要她的陪伴。她还拍得一手好照片，并且很慷慨地让我在书中使用了其中一部分。

向爱因斯坦和其他一些科学家致敬，无论你们的名气是大是小，但你们的探索发现，让我们见证了人类历史上最有意义也是变化翻天覆地的一个时代。特别致谢所有意识到跟公众进行有效沟通是一项重要技能的科学家们，这一技能值得发展并被尊重，尤其感谢将科普作为己任并热心推动的科学家们。

最后，向古老的恒星致以衷心的感谢，你们相对较短的寿命与华丽的死亡造就了我们——当然还有我们的原子——我们皆因原子而生。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

未讀

黑夜、黑体、黑洞、暗物质、暗能量 | 这些神秘概念为何被冠以黑暗之名?

LES IDÉES NOIRES DE

给好奇者的暗黑物理学

Roland Lehoucq
Vincent Bontems



北京联合出版公司
Beijing United Publishing Co., Ltd

不知黑, 焉知宇宙?
只看过霍金讲宇宙, 你将错过宇宙一半的精彩

黑夜、黑体、黑洞、暗物质、暗能量
讲述它们引发的一场场科学革命, 探索它们暗藏的种种文化隐喻

LES IDÉES NOIRES DE LA PHYSIQUE 附赠超酷【暗黑物理学】明信片

Roland Lehoucq / Vincent Bontems [法] 罗兰·勒乌克 文森特·博滕斯——著 张芳——译

版权信息

给好奇者的暗黑物理学

Les idées noires de la physique

作者：[法] 罗兰·勒乌克（Vincent Bontems）[法] 文森特·博滕斯（Roland Lehoucq）

译者：张芳

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

版权信息
前言　物理学中的黑概念
Part 1
A　黑色的夜空
膨胀的宇宙
最古老的光是何时发出的？
我们能看到宇宙视界之外的地方吗？
B　为什么夜空是黑色的
星座的黑色盒子
黑的选择
Part 2
A　黑体
黑体之谜
黑体是真实存在的吗？
最冷的黑体
B　黑体辐射
物体的暗黑性
黑射线
Part 3
A　黑洞
黑洞是什么？
在黑洞视界的边缘
在怪物的肠道中
一个不是那么黑的洞……
宇宙旋涡
B　黑洞引力
宇宙坍缩
忧郁的星体
黑洞的光辉
Part 4
A　暗物质
暗物质的发现
星系中的暗物质
星系团中的暗物质
宇宙幻象
宇宙中的暗物质
原始核聚变
一个新的定律？
暗物质的属性可能是什么？
B　暗物质的炼金术
一种比黑色更黑暗的黑

苦炼
宇宙的阿尼玛
宏观宇宙和微观宇宙的结合
Part 5
A　暗能量
令人惊奇的观测结果
解释的过剩
B　暗能量之谜
黑暗的教训
谁会杀死宇宙？
实体的迷幻
不必失望：并非一切都是黑色的！
结语　黑色的统治
返回总目录



前言　物理学中的黑概念

黑暗，构成了一个世界。

——亨利·米修[1]，《杂乱的无限》（*L'Infini turbulent*）

物理学中有很多与黑暗相关的概念，比如“黑色的夜空”“黑体”“黑洞”“暗物质”“暗能量”，正是黑暗勾起了我们的求知欲。我们两个，一个物理学家，一个哲学家，之所以会合作，是因为科学概念上的“黑”既有教育意义，又发人深思。为什么物理学家认为需要“黑化”这些概念？这个从普通语言中借用的词是什么意思？它对科学语言的制定是无足重轻且无甚影响，还是其中隐约包含着某种隐喻？总之，物理学中的黑概念会因为它们的“黑”而拥有特殊性吗？对于构想出这些黑概念的人来说，“黑”在我们这个时代的科学文化中又意味着什么呢？

尽管笔者非常欣赏安德烈·弗朗坎[2]的黑色幽默代表作《黑思想》，但是我们的书并不会涉及神经衰弱的物理学家们脑中阴郁的反复思考，而是关于“黑化”一些现象而产生的物理概念及其特殊性的反思。这种“黑化”是否意味着这些概念是相关的呢？但至少有一个值得注意的事实存在，而且应该为它写本书，那就是：这些概念都与过去或者现在的重要科学谜团有联系。几百年来，黑色的夜空让天体物理学家们魂牵梦萦；黑体辐射之谜是量子力学的起源；黑洞理论极具特殊性，在人们发现它的效应之前，天体物理学家就已经为之兴奋；暗物质是解决星系和星系团运动异常的假说；而暗能量则可以解释宇宙加速扩张的原因！关于这些黑概念存在进一步思考，然而这些可能和它们的黑化并没有直接关系。

黑，一定是因为光的完全缺失。但是在物理学中，黑却有特殊的意义。黑体并不一定是黑色的，黑洞也与颜色无关：它只是无法被看到。黑被归类为肉眼无法观察到的物理现象，这个特点因现象而异——天空的黑和暗能量的黑不同，但是观察的难度也会严重影响归类的结果。一个概念被定义为黑并不是偶然的。在科学语言中，形容词“黑”上发生了一个被加斯东·巴什拉[3]称为“语义革命”的变化：它的意思改变了。它的原始含义被提纯了，被重新定义了，这样它就只被用来表达物理学家需要它表征的对象属性了。于是，黑不再是一种颜色，而是成了一个单义的科学术语。

其实，这是科学家努力想要达到的结果。

必须承认，由于某个词语在普通语言中已经具有了含义，因此这样

的发源总会留下痕迹，它会默默影响科学的表达方式，也会带给这种表达方式一丝隐喻的意味。就好像物理学家关于黑概念的学说都有一个黑色影像的光圈如影随形。在物理学家做论证时，他必须摆脱这些黑色的影像，才能使自己的理论建立在清晰和鲜明的概念与精细的公式和算法上，可是这并不表示这些黑色的影像不存在，它们必定存在于物理学家无尽的遐想中。因此为了理解这些黑概念，不仅需要分析物理学是如何把“黑”这个形容词的字面意思，做了深刻的变化，还要阐释这个既可以表颜色的形容词，又可以用作科学短语的词汇是如何获得这些含义的。每一个黑概念都对应着一个黑色的图像（或影像），就像是通过语言将影子投射在想象中一样。掌握这些黑概念的物理学家可以不去理会这些黑色的图像，但这恰好证明他必须在这些图像干扰科学思维的时候将它们摆脱掉，或者在被它们激发起好奇心时将它们升华。因为我们无法用这些图像来完成推理，但是也无法将思维和图像完全分离。我们不能将二者混淆，也不能将它们错误地融为一体，于是我们决定在这本书中，既从认识论和历史角度分析这些黑概念的科学含义，同时也探索黑色图像的象征意义。

与此同时，我们会继续加斯东·巴什拉的研究。巴什拉是第一个将认识论分析与心理学分析的一种特殊形式相结合，并使用这种分析方法的人。1938年，他出版了两部既不相同又互为补充的著作：《科学精神的形成》和《火的精神分析》（全书名为《火的客观意识的精神分析》）。在《科学精神的形成》中，他解释了科学精神必须首先克服“认识论障碍”，因为它们会妨碍和阻止科学精神对现象进行精密的思考，这些障碍往往只是普通语言所建立起来的想象。在《火的精神分析》中，他研究了一些与火相关的图像来证明它们之间的关联并不是随机的：它们之间的联系方式虽然与逻辑关系完全不同，却是非常精确的。在这位著名先驱的启发下，我们首先要点明物理学中每一个黑概念的含义，以及与这些概念相应的黑色图像的含义，留待读者来判断这些学术上的含义与隐喻的含义是否不可分割、相互补充或者相互交错。但是，在开始从黑色的夜空到暗能量的旅程之前（我们还会谈到黑体、黑洞和暗物质），我们先试着确定一下物理学中“黑”字在研究者脑中的笼统含义，以及“黑”字在诗人和幻想者的脑中会产生什么样的图像。

* * *

为什么物理学会将一些物质看成黑色的呢？为了回答这个问题，我们首先要知道“看”在物理学中是什么意思。长久以来，物理学家不再通过自己的肉眼感觉来观察现象，而是使用工具：从伽利略的天文望远镜到各种显微镜、分光镜，再到最近的粒子加速器。这些探测仪器可以让我们与一些本来无法感知到的现象进行互动。著名的“观察者”就是一个机器。科研人员会首先介入，做出预测，准备实验并校准探测器，在观察之后，说明结果，纠正自己的假说，并得出必要的结论。可是，在观察期间，技术才是最重要的。为了强调技术干预的重要性，巴什拉创造了一个新词——“现象技术”（《新科学精神》，1934年）。这个混合词

是将现象与技术联系在了一起，它意味着，从此以后，“现象”的意思发生了变化。它的传统定义是“主动展现给大家看的东西”，而科学现象不是“主动展示”，它是通过实验建立起来的。亚里士多德是绝不会做实验的，因为这是对大自然的侵犯。19世纪，实证主义者们依然将实验作为检验先验现象的衡量标准，然后试图用数学规律对现象进行描述。在当代科学研究中，“新的现象不是简单地被发现，而是被创造，被一点一点建立起来的。”（《研究》，19页）研究者不是观察“事实”，而是根据理论的数学结构，通过使用高精准的技术来创造“效果”。因此，“看”意味着在物理理论的基础上创造现象技术，而这个现象技术（可能）会使一些新的甚至预想不到的现象显现出来。

乍一看，这样的观察方式只适用于粒子物理学这样的实验科学，而不适用于天文学这样的观测科学，因为在观测科学中，我们无法按照自己的意愿创造现象。然而，现象技术不只应用于粒子加速器，也出现在天文观测台。研究者们通过信号来观察宇宙，这些信号有时很微弱，它们的波长不在可见光谱的范围内，甚至是靠光子以外的其他粒子来传播的。研究者的仪器可以让我们看到肉眼不可见的现象。基于抽象的假设和复杂的运算，天文学家制造出一些高端的仪器来搜集隐藏于其他波长中的信息。“看”的含义始终是“与现象进行互动，对这个互动进行测量并从中获得与现象相关的信息”。第一个信息的传播媒介是光，科学家自然而然地在他们的非正式语言中保留了和视觉相关的词汇。然而大部分的时间里，被研究的现象不是与光、声波或中微子相互作用，而是与其他频次的电磁波相互作用。即使光不再参与互动，现象技术也必须能够接收和计量与被观测的系统互动时所产生的信息。

现在，我们已经确定了“看”对于一个物理学家意味着什么，那么我们就能毫不费力地猜出他赋予“黑”的含义：基本上，就是他看不到或者看不清的东西。在物理学中，黑代表抵抗探测的物质，不会和电磁波相互影响的物质，或者该物质与电磁波以某种方式发生互动，而以我们目前拥有的现象技术无法接收到相关信息。黑色天空的谜团已经用它自己的方式提出了疑问：恒星的光本应该从各个方向到达我们的眼中，可我们为什么却感知不到呢？黑体将所有的电磁波吸收却不发出任何反射；黑洞是一个实心的天体，这所有人都知道，它使光线无法逃脱引力的影响（物质自然也一样）；暗物质是一个关于物体质量与光线不会相互影响的假设；最后，暗能量可能是最晦涩的概念：它不仅无法被观察到，而且还可能是对抗万有引力的一个力量来源。

所有这些黑概念，虽然混杂，但从概念层面讲，总和“黑”或“暗”有一些关联：它们被应用在物理学家无法看到的现象上。在这本图文结合的书中，我们要强调指出的是，这些黑概念生发出了一些问题，而这些问题是我们正在试图了解或者还无法弄清楚的。它们的情况难以阐明：这究竟是事实，还是暂时无法证实的理论可能，抑或只是空想？

* * *

除了关于黑概念的认识论分析，我们还将使用“黑暗的精神分析法”。在《火的精神分析》一书中，巴什拉发明了一种新型的、独特的精神分析法。这种方法不是要记录一个静止地搁在沙发上的火焰的秘密，而是要统计火的形象和象征，因为自远古以来，火激发了人类无穷的想象，火的破坏性也阻碍了人类的认知。巴什拉的精神分析法旨在荡涤束缚科学精神的形象。因为火的古老形象并不是客观的。这些形象阻碍了人类对燃烧现象的理解。为了摆脱束缚，科学精神始终需要对抗自身的自然倾向，比如它会把一种物质归于热量，再将热量理解为一种微妙的气体。巴什拉希望将我们的精神从这些给我们造成混乱的形象中解放出来。在这里我们强调，巴什拉的这个计划是有悖传统的，而它很快就会被一些更加精妙、更加形象的分析所取代。因为，这位来自奥布河畔巴尔地区的哲学家最终会被自己所研究的隐喻的魅力深深吸引。他乐此不疲地详尽地描述火焰的形象，宣称要把我们从火奇怪的“复杂”中解放出来。

我们也想本着这样的精神做研究，尽可能使黑色形象的学术特征（目的是让每一个遐想都明确意识到想象对理念的扭曲，即使这想象因理念而生）和自由联想的荒谬特点（目的是让遐想保有自发性。遐想不是理念的仿制品，而是我们的文化共鸣的结果）两者之间达成平衡。

尽管如此，人们可能会考虑“黑”是否契合这个研究。在巴什拉看来，火因其在人类进化中扮演着至关重要的角色，是集体想象中至关重要的元素。那对于“黑”来说，情况相同吗？巴什拉还写过其他一些关于火的诗集，以及关于水、空气、土的作品。他以此证实了一个观点，那就是只有用于炼金术的四种元素（空气、水、火、土）是构成集体想象的最重要物质。然而仔细想来，这个论点是武断的。如果火的形象是从人类能够使用火的那一刻开始根植于集体想象中的，那么在此之前，夜晚的黑暗笼罩了我们那么久，我们又该如何描述这个更加古老、更加强大的形象呢？

巴什拉在他的《水与梦：论物质的想象》中研究了“黑水”的形象，他自己也做出了这样的思考：如果黑水的形象是融合了水和夜晚的形象，那么岂不是应该承认夜晚和水一样，是原始而深刻的想象实体吗？

当我们要对水与夜的结合发表一些见解时，似乎与我们关于物质想象的总的观点相违背……然而，物质的遐想是如此自然，如此不可抗拒，以至于想象通常会接受这个梦幻，这个出现在积极的夜晚、深邃的夜晚、潜进的夜晚、进入各种事物中去的夜晚的梦幻。此时，夜不再是一位蒙着黑纱的女神，也不再是帷幕，遮挡着大地和大海；夜是夜晚，夜是一种实体，夜是夜间的物质。物质的想象控制着夜。正如水是最适合用来混合的实体，夜会深入水里，使湖底失去光泽，会浸润池塘。有时，夜的渗透是如此深入，如此隐秘，以至于在想象中，池塘在白昼依然保留了一点夜间物质，一点实体性的黑暗。（《水与梦》，137页）

我们接受这个假设：所有的黑色形象都拥有它们各自的特殊性，这

个特殊性源自黑概念在想象中的转换，但是这些黑色形象都具有同一个想象元素的性质，即我们称之为“黑暗”的夜晚物质。

由于巴什拉感受到了黑暗元素的丰富和强大，他甚至创立了一个系统研究黑色形象的项目：“如果我们能将所有的黑色形象集中并分类，我们想象可以整理出很好的文学素材……”（《土地与对静息的遐想》，1948年，90页）。他虽然没有完全考虑过将物理学里的黑概念当作遐想的动机，可却注意到了和这些概念相符合的众多黑色形象的特殊性：布满星星的夜空的透明的黑，身体内部的黑，旋涡令人眩晕的黑，炼金术士在黑暗中完成的作品所包含的可变的黑，黑暗中隐藏的神秘的黑。他的这些直觉先于我们的研究，我们发现，在我们始于物理学的遐想和他始于文学素材的遐想之间存在着共鸣。当然，我们不会仅仅局限在这种共鸣中，我们将探索我们的文化带来的所有相关启示。

Part 1



A　黑色的夜空

夜晚，只是对于我们是夜晚，

因为我们的眼睛是黑暗的。

——勒内·巴雅维尔[4]，《月下的哥伦布》（*Colomb de la lune*）

远离大城市和它的灯光污染，夜晚的天空呈现出深邃的黑色，星星点缀其中。没有人会认为这种说法奇怪：夜晚是黑色的，因为太阳落山了。白天万里无云的天空呈现出蓝色，它的光完全淹没了恒星微弱的光；而到了晚上，地球的大气层便不再呈现这种蓝色。直到发现夜空是黑色的，天文学家约翰尼斯·开普勒（1571—1630）才第一次认识到宇宙学的意义。开普勒支持哥白尼的日心说，和哥白尼一样，他认为宇宙包含了一定数量的恒星。英国天文学家托马斯·迪格斯（1546—1595）也支持哥白尼的理论，但他认为宇宙是无限的，并且恒星是均匀地分布在宇宙中的。开普勒反对这个假设，他说如果是这样，那么亘古以来，宇宙会出现无数颗恒星发射的光芒：我们看到的天空底色应该是无比明亮的！但事实是，我们看到的并非这样，说明宇宙是有限的。

18世纪，英国天文学家埃德蒙·哈雷（1656—1742）和瑞士天文学家让-菲利浦·路易斯·德·舍索（1718—1751）的研究使用了一种更为定量的方式来解决这个问题。1720年，哈雷在假设宇宙是无限的并且恒星在宇宙中均匀分布的前提下，计算了这个无限宇宙中所有恒星发出的亮度。为了完成这个计算，他以观察者的位置为圆点，将空间切割成一系列厚度相同的同心圆。他的计算方法是确定每一个同心圆中恒星呈现的亮度，然后将这些亮度相加得出从地球观察到的亮度的总和。如果我们假设每颗恒星的亮度都相同，那么一个圆的亮度就应该是每颗恒星的亮度乘以圆内恒星的数量。如果恒星是均匀分布在宇宙中的，那么圆中恒星的数量会随着这个圆容积的扩大而增多，圆的容积等于半径的平方乘以固定的圆环厚度。而恒星的亮度会因为它距离的遥远而变得微弱，更确切地说，一颗恒星的亮度会随着这个圆半径平方的增大而减弱。因此，恒星亮度与恒星数量的乘积并不受距离影响：当距离变远，恒星的亮度会减弱，但正是因为距离变远，圆的半径会变大，其中包含的恒星数量也会增加。因此，所有的圆以相同的方式给地球提供光亮，这些光亮的总和是无限的。这就是开普勒天才预设的准确结论。

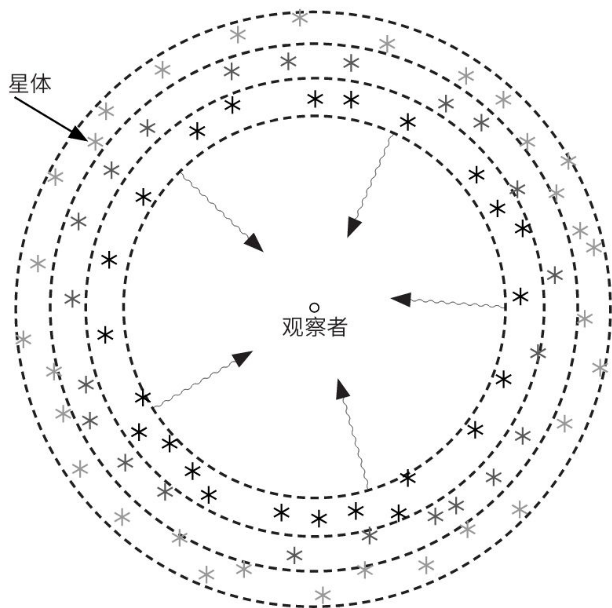


图1.将宇宙切割成相同厚度的同心圆。每一个圆中恒星的数量会随着圆半径的扩大而增长，尽管随着圆半径的增大恒星的亮度会减弱，但是每一个同心圆发出的总亮度是相同的。如果宇宙是无限的，且恒星均匀地分布其中，那么我们头上穹顶的亮度就是无限的。

为了避免这种致盲的亮度，哈雷认为，在真空状态下，恒星呈现出的亮度与它和地球的距离的平方成反比，因此亮度减弱得更快。随着距离的增大，恒星亮度的衰减更大，哈雷得出的这一结论与观察到的结果相符，同时也保留了无限宇宙的猜想。1743年，路易斯·德·舍索通过假想一个由不透明介质构成的宇宙，从物理学的角度解释了这一结论。我们之所以无法看到距离遥远的恒星的光，是因为我们与它之间隔着不透明介质构成的空间，而光被这个介质吸收了。但是一个世纪之后，英国天文学家约翰·赫歇尔（1792—1871）驳斥了这个论点：星际间的介质吸收了恒星的光，就一定会升温，那么这个介质就会发亮。赫歇尔指出，星际间介质的不透明性如此之弱，以至于天空的背景应该和恒星表面，比如太阳，一样明亮。在这个推理的最后，无限光亮的假想被推翻了，但是在无限宇宙的框架下，夜晚的真实存在依然构成明显的理论矛盾。

1823年，德国医学家、天文学家海因里·奥伯斯（1758—1840）也开始关注夜晚天空的亮度问题。他使用不同的论据，得到了和路易斯·德·舍索相同的结论。在一篇题为“宇宙空间的透明性”的文章中，他写道：“假设在无限宇宙中确实有不止一个太阳存在，并且它们之间的距离几乎相同，或者分布在不同的星系当中，它们的总和是无限的，那么整个天空就应该和太阳一样明亮。设想我们的视线是一条直线，那么从我们的眼睛出发的每一条线都必然会与任何一颗固定的恒星相遇，因此天空中的每一个点都会带给我们恒星的光，也就是太阳的光。”在推理中，奥伯斯强调了一个事实：近地恒星可能会遮住距离遥远的恒星。因此，

并不是无数的恒星为夜晚的天空带来光亮，而只是最靠近我们视线的那些。因此，夜空背景的亮度也不是无限的，而是和一颗恒星表面的亮度相同。虽然宇宙是无限的，奥伯斯的论点表明了可见度极限的存在：在这个天际线之上，我们接收不到任何光亮，因为遥远的光源被近地光源遮住了。我们可以和一个在森林里散步的人做类比，森林里的树木也差不多是均匀分布的：无论这个散步的人看向哪个方向，他的视线必然会被树干挡住，无法穿过整片森林。奥伯斯并没有量化这个“障碍物”的距离，即那颗遮挡住我们视线的星球的距离，但是我们可以再次通过将宇宙切分为厚度相同的同心圆的方式，来简单地估算这个距离。我们的视线会接触到一个属于某同心圆的恒星，这个概率等同于这颗恒星的几何截面（圆面面积）与它所属的同心圆的面积之间的比例。考虑到一个同心圆包含的恒星数量，每单位长度的概率等于恒星密度（每单位体积的恒星数量）乘以几何截面的乘积。这个概率的倒数就是我们的视线可以看到的恒星与我们相隔的典型距离。假设恒星的体积和太阳相同，并且它们在空间中分布的密度与可观测到的宇宙中可测物质的平均密度相同。那么这个距离极限大约就是1022光年，虽然很大，但不是无限。最后，宇宙是不是无限的就不重要了，如果它比视线的极限更大，那么天空应该和一颗恒星的表面一样明亮。

这个解法从何而来？令人意外的是，它从诗歌而来！在下一章，文森特将唤起关于夜空的诗意遐想，而在此之前，必须要提到埃德加·爱伦·坡（1809—1849）的作品。1848年，他发表了《尤里卡》，里边有一首讲述他关于宇宙思考的长篇散文诗《关于物质和精神世界的随笔》，在这首诗中，爱伦·坡引用奥伯斯的论点来谈黑色的天空的问题：“如果恒星是连续的无限的，那么天空的背景将会呈现给我们一个不变的明亮，如银河倾泻一般的光亮，只因在这个背景中，没有任何一个点是恒星照耀不到的。”（《尤里卡》，第11章，170—171页）随即，爱伦·坡又给出了结论：“因此，在这种情况下，唯一可以解释我们用望远镜从不同方向只观测到空白的就是，假设这个看不见的背景距离我们异常遥远，以至于那里的光线无法到达我们的眼中。”已知光的传播速度是有限的，确认遥远天体的光亮无法到达我们的视线就是假设它们并不一定是存在的。因此，或许应该将无限的、从任何方向都能看到恒星的宇宙与聚集了光线可以被我们看到、观察到恒星的宇宙区分开来。如果恒星的寿命非常有限，那么布满夜空的发光星体永远无法形成。

在1861年出版的一本书中，德国天文学家约翰·冯·马德勒将爱伦·坡的天才预测形式化了。首先，他重新提及光速的有限性，这是丹麦天文学家奥勒·罗默于1676年在巴黎天文台通过观察木星的卫星运动得出的结论。其次，他认为宇宙的年龄是有限的，就此可得出结论：我们无法看到所有的恒星，只能看到那些与我们的距离低于光在宇宙年龄增长的时间内运动的距离。在那里，会出现一条天际线，天际线以外产生的光都是我们无法看到的。1901年，开尔文勋爵（1824—1907）通过研究恒星发亮的物理学原因估算出了恒星的寿命，从而完成了这一论证。他认为，恒星并不是永恒存在的，也不能永久发光，因为它的能量源是有限的。例如，太阳的唯一能量来源是在自身引力影响下的聚合反应，于是

他可以确定跟太阳类似的恒星的寿命：太阳的寿命约是3000万年。但问题是：以查尔斯·达尔文（1809—1882）为代表的地质学家和博物学家测算出地球的寿命要远大于太阳的寿命，这就是一个非常明显的矛盾。为了让太阳能够持续发光，法国物理学家让·佩兰（1870—1942）和英国物理学家亚瑟·爱丁顿（1882—1944）在20世纪20年代初提出了恒星的能量来自原子核的理论。几年之后，德国物理学家汉斯·贝特（1905—2005）发展了这一理论，他描述了在太阳中心发生的热核聚变反应，因为只有太阳中心这一地区的温度和密度足以使反应发生。一颗与太阳体积相同的恒星，其核能量储备足以使它发光近100亿年（体积比太阳大的恒星的寿命比太阳短，因为它的亮度更高，其消耗核能的速度和它的体积的立方成正比）。我们无法看到距离我们超过100亿光年的恒星，因为它们的光还没有传播到我们这里，这就使我们可以看到的恒星数量明显减少。如开尔文勋爵指出的："如果广袤宇宙中所有的恒星同时发光……能够到达地球的光亮也只能是所有恒星光线中非常微小的一部分。"这就可以解决黑暗夜空的问题了吗？是的！原因是，如果我们假设恒星均匀地分布在宇宙中，所有同心圆可以带给夜晚的天空同样的亮度，当观察半径为100亿（10^{10}）光年时，奥伯斯通过因式$10^{22}/10^{10}=10^{12}$计算出的天空的亮度，使得天空由明亮耀眼变成了美丽的黑色。在这一阶段，天空是黑色的，因为我们只能看到离我们足够近的恒星，它们的光传播到我们眼中花费的时间短于它们的寿命。也就是说，由于光速的极限和恒星有限的寿命这两个相互结合的因素，才使我们只能看到无限宇宙的一小部分。一条天际线阻隔了我们对宇宙光线的感知。

膨胀的宇宙

古典物理学的无限和静止宇宙是提出黑色夜空问题的宇宙论前提，这个解释在这个前提下是有效的。但是当今宇宙学模型的背景是膨胀的相对宇宙，在这个框架中，我们的解释依然成立吗？宇宙扩张的第一效应就是会弱化遥远星系的恒星散发的光，实际上就是减少了可直接使用的光源。还要考虑到另一个现象：宇宙的膨胀使来自遥远星系的光线变得发红——这是第二个效应，它是由于光波在膨胀的空间中传播发生扩张导致的。然而，在接收的光子数量相同的情况下，一个天体发出的光线越红，它就显得越昏暗。如果遥远的星系与我们相对静止，那么它们的亮度就相对显得更低。由此得出，距离我们越远的天体，它们的亮度就下降得越快。正因如此，最遥远的星系是很难被观测到的：即便使用最巨大的天文望远镜，对红外光非常敏感的探测器，也需要很长的观察时间来捕捉它们微弱的光。

最后，在目前的宇宙学领域，需要将两个效应结合起来才能解释为什么夜空是黑色的。首先，恒星和聚集了恒星的星系的寿命是有限的，这就限制了宇宙中被发射的光子数量。其次，宇宙的膨胀降低了光子的密度，颜色变红减少了每一个光子的能量。详尽的计算表明，在这两个因素中，第一个因素占主导地位，相对于静态宇宙，宇宙的膨胀最多可以使天空背景的密度降低四分之一。然而值得注意的是，在目前的宇宙学模型背景下，膨胀是加速的，最终星系逃离我们的速度比它们的光传播到我们眼中的速度要快。它们会逐渐离开我们可以观察到的宇宙，然后被我们遗忘。

最古老的光是何时发出的？

黑色夜空的问题让我们开始思考“宇宙视界”的概念。夜晚的天空之所以没有太阳的表面那样明亮，主要是因为宇宙中星体的生命周期有限，我们只能看到其中的极小部分。同样，光速也是有限的，超过宇宙视界这个边界，将不会有任何光传到我们眼中。我们估计，迄今为止可以被观察到的最古老的星系的光，早在太阳和地球形成之前就已经出现了（地球的形成是在45.6亿年前）：它的光偏红的程度说明，它是在132亿年前发出的。

恒星和星系不是宇宙中唯一的光源。如果现在的宇宙是膨胀之后的结构，那么在它的初始阶段，它曾经非常炎热，密度很大，是质子、电子和光子的混合体。光是和物质紧密相关的，自由电子不断发出光，光就会不断地改变方向。一切就像发生在雾中，雾中的水滴会使光线漫射并阻碍光的传播。像在膨胀的气体中一样，宇宙的膨胀会冷却和稀释它包含的物质。在一定的温度下，电子和质子的运动会变得非常微弱，它们相互结合形成了第一批中性氢原子。这个变化彻底改变了宇宙的境况，因为伴随着自由电子的消失，光失去了阻碍，可以自由地以直线形式传播。雾散了，宇宙变得透明起来。

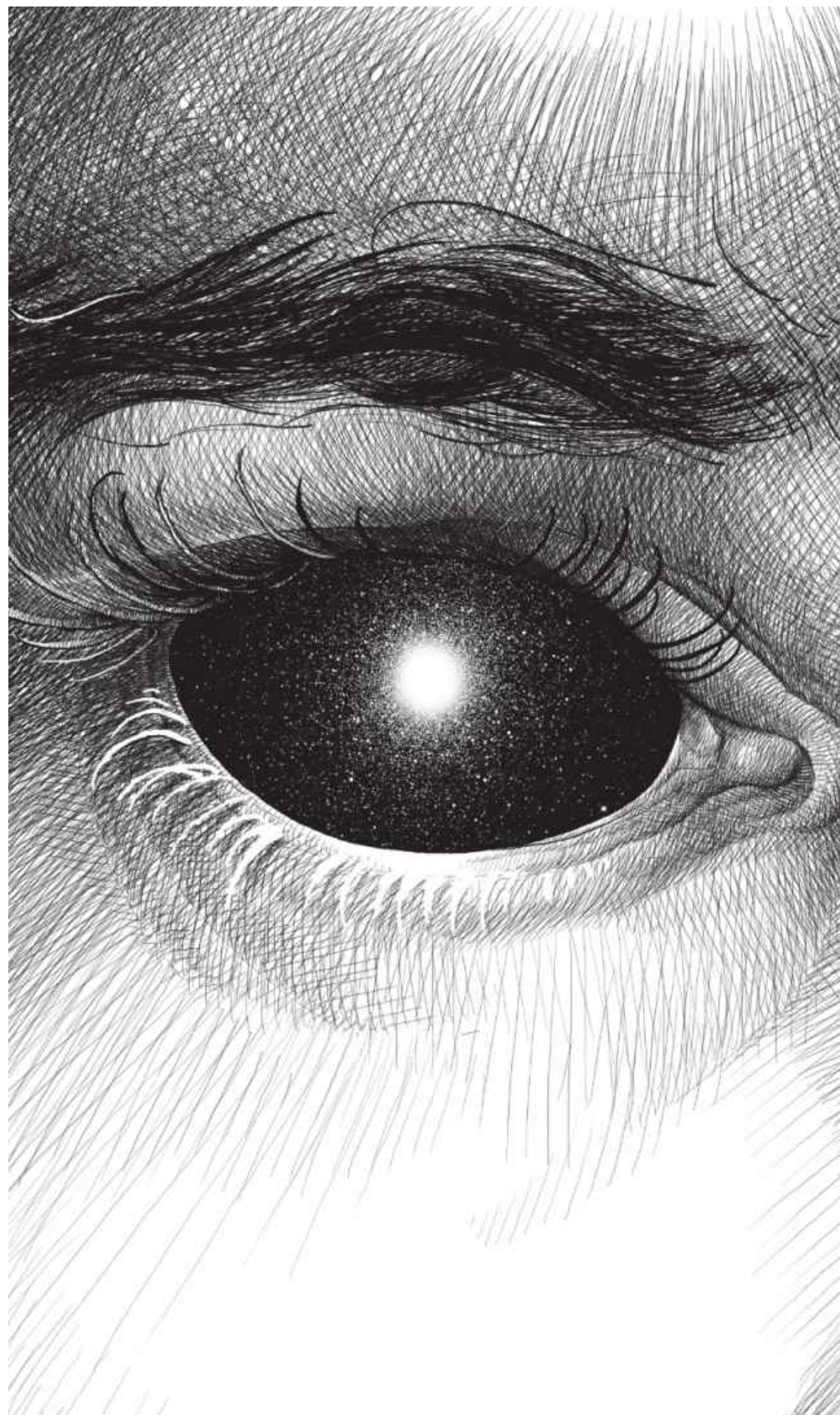
黑夜佯谬具有特殊的重要性，因为光在氢原子形成的时候得到了释放，现在它依然照耀着宇宙。光在一个接近恒星温度的情况下发射出来，为什么我们不能在天空的任何角落都看到它呢？原因非常简单，就是这个原始的光（最初就是可见的光）由于宇宙的膨胀，它的波长增长了。现在它以肉眼看不到的微波形式被人类探测到，这些原始光子的平均能量是可见光能量的千分之一，它们的光通量也比恒星的光通量要弱几千亿倍。这个“化石光线”可以让我们看到宇宙最原始的景象。它似乎是从一个可见的宇宙的边界发出的，一个时空的区域，超出这个区域，任何光线都不能到达我们眼中，因为在此之前物质是黑暗的。我们依然无法了解更加古老的时代，因为有宇宙视界的存在，而根据最近的估计，宇宙视界的光花了近138亿年的时间才传到地球。

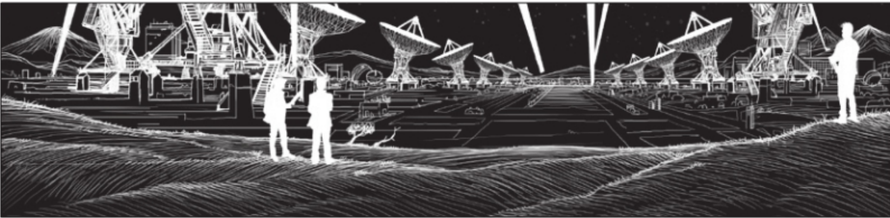
我们能看到宇宙视界之外的地方吗？

既然宇宙视界是由光第一次在宇宙中自由传播的时间限定的，那么我们提出是否能看到宇宙视界之外的地方这个问题似乎自相矛盾了。然而，这还是有可能的。为了做到这一点，我们要丰富我们的研究方法，不仅是对光的研究，还要把注意力集中在最容易消失的粒子和中微子上。要了解化石光线的来源，就要追溯到温度高达几千摄氏度的时代。让我们继续这段在远古的旅程，想象一个温度超过100亿摄氏度的宇宙：在这些极端条件下，任何原子结构或者原子核结构都无法存在。宇宙流体是一个由质子和中子构成的混合物，它包含了大量的电子、正电子、中微子、反中微子和光子。其中中子是很特殊的，它是一个不稳定的粒子，在不到一刻钟的时间里，它就可以通过释放电子和反中微子变成质子。中子之所以不会快速消失，是因为质子在高温中可以发生反向变化，它可以通过吸收反中微子或者电子再变成中子。于是中子和质子的数量达成了平衡。

由于宇宙的膨胀，温度下降了。这个温度不足以维持中子和质子之间的平衡，因为中微子不再和物质产生相互作用：它们开始在等离子区中自由传播，等离子区对于中微子来说变得透明。这个情况和光子遇到的情况完全一样，温度下降到一定程度，氢原子产生，光子自由传播。于是中微子能量分布的形式固定了，它们的温度也随着宇宙的膨胀而下降。一种更为古老的中微子的“化石光线”存在下来，估算其温度为1.95开尔文，它见证了宇宙中充满阻光物质时的环境，也就是位于我们之前确定的光线视界之外的时候。

那么，我们可能观察到这些宇宙中微子吗？很遗憾，答案是否定的，因为它们的能量十分微弱，与宇宙微波背景中的光子能量差不多，而且中微子几乎不与物质发生作用：太阳中心核反应释放出了中微子，需要一个超过1光年厚度的铅板才能阻止它们运动，而太阳中微子的能量是宇宙中微子能量的100亿倍。如果在探测中微子方面没有重大进展，我们就没有机会穿透宇宙视界的屏障。如果没有更好的解决方法，我们只能在脑海中让原始宇宙变得透明。





B　为什么夜空是黑色的

我们用蜡烛点亮世界，

一切显得遥远而阴影重重。

——皮埃尔·勒韦迪[5]，《星空》（*Ciel étoilé*）

在我们将要研究的所有黑之中，夜空的黑看上去是最不奇怪的。当我的朋友罗兰提到夜空的“黑”时，这个形容词的含义在他的笔下似乎没有经历科学语言的语义变形，所有人马上就能明白它的意思。乍一看，这个黑是普通的。当天文学家思考“天空为什么是黑色的”这个问题时，他参照的是关于夜空思考的普遍体验。

但不得不说，这个黑仍然很特殊。它拥有一段完整的历史，并且毫无疑问，它出现在哲学家、诗人和学者的语言中，这赋予它一个确切却自相矛盾的含义。天文学家不会思考为什么豹子和油橄榄是黑色的，这个黑也不是乌鸦羽毛的颜色，也非来自乌木、煤炭或者黑烟。它和导致黑潮的黑色无关，也和“险恶用心”这个短语中包含的关于“黑”的隐喻无关[6]。长久以来，关于天空的沉思将“黑”从这些普通的所指实物中提炼出来。黑并不是从地球发出，笼罩在某一个物体上的色调，而是缺少恒星光照的标记。因此，这里说到的黑只指天空的背景以及巨大的宇宙空间。准确地说，它指的是恒星的光线可以穿越的黑暗。因此，天文学家看到的黑是清晰透明的。黑本身是星际真空的一部分，而它却自相矛盾地证明了宇宙空间透明性的存在，因为这个透明使得恒星的光线可以穿越遥远的距离到达地球。

黑通常具有模棱两可的意味，因此它常被用在隐喻当中，而这个透明的黑是清楚而确定的，它同样具备情感上的共鸣。星空的形象——繁星点点的夜晚——是一个无穷大的形象，是诗人无穷无尽的隐喻，是一个引发所有人遐想的景象。

黑色的透明性：半透明介质

天空的黑色是一个自相矛盾的色彩：它既代表颜色的缺失，也代表可以让光线通过的透明性。远古时代，哲学家们就已经认识到这种模糊的透明的特殊性。亚里士多德（公元前384—前322）首先将它命名为“半透明介质”。

亚里士多德在他的作品《论灵魂》中，就视觉这个主题给出了解释，视觉首先是对色彩的感知，而色彩的传播需要依靠一个可以被染色的介质：半透明介质。在这一过程中，半透明介质变得明亮，并且可以传播色彩："通过半透明物质，加上一个外来色彩的出现，我看到了原本看不到的东西。"（《论灵魂》第二卷，7页）于是我们认为半透明介质是看不到的，事实上，亚里士多德列举了空气和水这样的透明流体的例子。我们感兴趣的点是，他还指出只有被光线激活的半透明介质，被他称为现行的半透明介质，才是透明的（并且会吸收穿过的光线的色彩），而那些潜在的半透明介质，没有色彩出现的，始终是黑暗的："只是处于潜在状态的半透明介质依然是黑暗的。"（《论灵魂》第二卷，7页）然而，这种关于潜在半透明介质的黑暗性的说法一定源于对夜空的观察，因为亚里士多德也明确指出："由于火或某种类似火的物质对地球轨道以外的物体产生作用，半透明介质处于完成状态（也就是说它将自己的力量现实化了），可以说，光线就是半透明介质的颜色。""地球轨道以外的物体"指的就是天体。这就意味着，夜空的黑暗是潜在的半透明介质导致的。黑色的天空是透明的，因为恒星的光可以穿过它。亚里士多德没有将这个黑色与地球物质的黑色混为一谈。我们可以把问题"为什么天空是黑色的"解读为"为什么夜空的半透明性只能是潜在的"，尽管如此，如亚里士多德学派的信徒所说，我们只能冒着不被理解的危险才能获得这样的精确，因为我们讨论的"半透明介质"这个词在现在的语言中，只有形容词"半透明的"这一种意思。

彩色的夜空

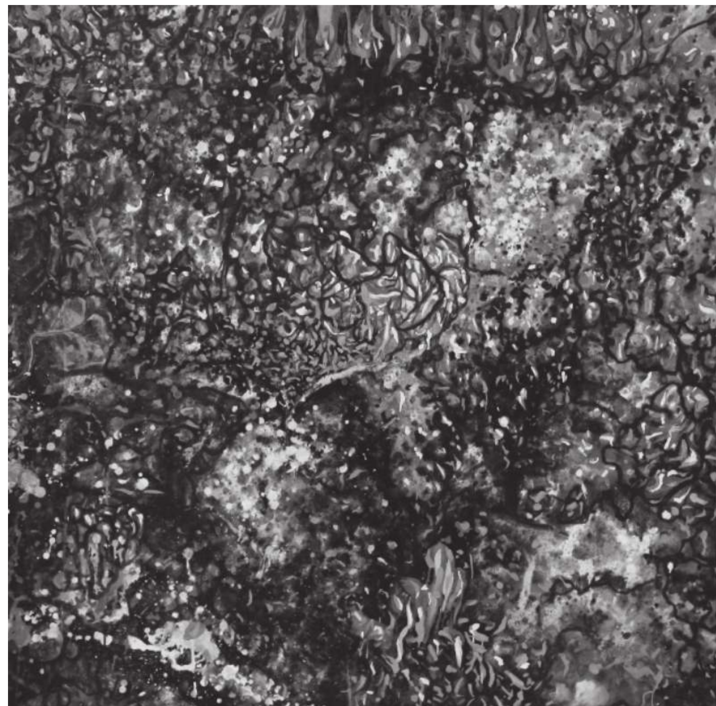
那么，为什么夜空是黑色的？诗人可能会告诉你，夜空在过去并不是黑色的，它曾经是蓝色的。中世纪装饰宗教书籍和文稿的彩图证明了这一点，画家们依然保留着关于"蓝色夜空"的记忆，直到文艺复兴时期，夜空才变成了黑色："实际上，图像中的夜空通常是蓝色，而不是黑色。中世纪宗教书稿中的彩图和绘画已经说明了这一情况。"（米歇尔·巴斯图罗，《当代色彩辞典》，1992年，135页）事实上，在黑色独自占领夜空之前，黑色与蓝色有一段很长的共存历史。诗人们依然记得："我们的头顶上是天空，在它美丽的蓝黑色彩上，点缀着点点繁星。"（查理·费尔迪南·雷默兹、艾美·巴驰，《来自沃州的画家》，1911年，289页）

夜空的模糊色彩和半透明介质一样古老而清晰。从诗歌的角度看，夜空是蓝黑色的，是因为古人只用了一个形容词来描写天空中这两种颜色混合的色调。古希腊人称之为"kuanos"，拉丁人将它翻译为"caeruleus"（天空的颜色），法语中有了"céruléen"这个词，就是"天蓝色"的意思。因此这个首先用来形容夜空的颜色就此产生，最终半透明介质也失去了最初的黑暗，成为表达白天天空的颜色。然而，关于夜空颜色的讨论并没有结束。艺术家们深知这一点，并在他们的诗歌或绘画中赋予它颜色。阿瑟·兰波[7]在他美妙的诗歌《醉舟》中赞叹他并未见过的北极光："我梦见过绿色的夜空，在炫目的白雪中。"之后他又在《彩图集》中描写"十个月的红夜"，很可能参照的就是当太阳永不升起，在

天际线出现了恒久的光芒时，从极圈外看到的天空发红的色彩。在夜晚的深处，所有的颜色都可能喷薄而出。

在当代画家中，我最欣赏的是热尔曼·卡米纳德（1973— ），尤其是他的《572星系》，在这部作品中，原始的黑暗中出现了彩色的星云，这些星云交织在一起。面对他的巨幅画作，我们的视线感受到了趋向无限大的相位差：他的画将我们的感觉扩展到了天际。奇怪的力量在气云中发挥着作用，而恒星就在气云中杂乱地产生。通过色彩的层叠和交织，星体之间产生了无法测量的关系，它展现在观察者的眼前，宇宙的狂热景象让观察者目眩。凝视着这些色彩，我仿佛看到了世界的起源，天文望远镜让我们看到了带着“假色彩”的宇宙，看着望远镜里的画面，我惊得目瞪口呆（这些画面是由肉眼无法看到的光线组成的，我们会赋予这些画面一些色彩）。

和天文物理学家一样，卡米纳德用自己想象的工具，在超越普通光谱的频率上探测现实。这些被重新发现的色彩数量巨大，它们在极度黑暗的背景上显得格外突出，其拥有的强大魔力几乎到了可怕的程度……宇宙中一股狂热的力量猛烈地迸发出来，超出了我们承受的基准。银河幕布的美丽激烈地流淌，在超现实主义者眼中，这美丽抽动着；而在古典主义者眼中，这美丽是宁静的、悬置的，它强大的力量将我们个人命运中虚幻的躁动化为乌有。“让我们暂时或者永远忘记自我吧，享受真实的光辉”，这是急速增多的星体传递给我们的消息。



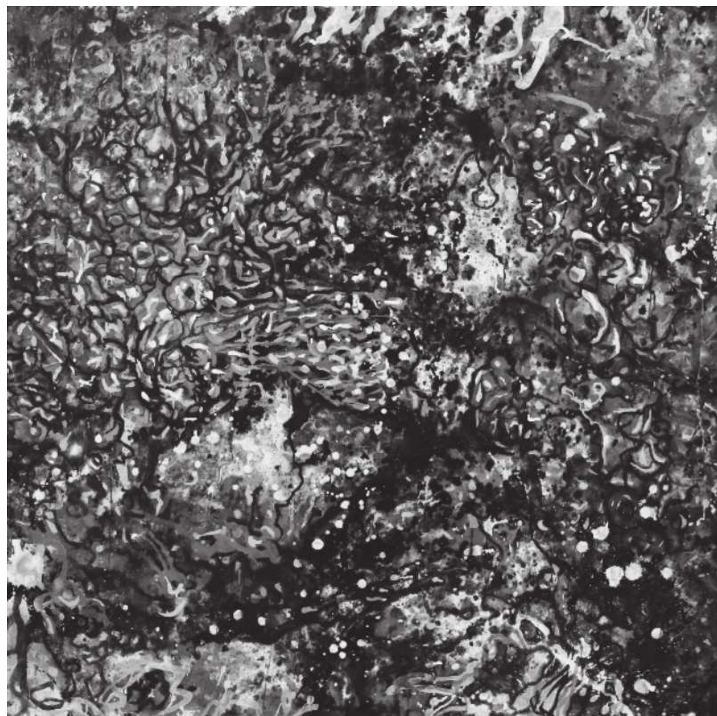


图2.《572星系》，热尔曼·卡米纳德，2011年。2×130×130cm，油画，私人收藏。

星座的黑色盒子

天空的黑暗体现了宇宙无法估算的维度，它让我们感受到地球和恒星之间遥远的距离。这个黑色是夜晚高空的颜色，是宇宙背景的半透明色，而不是覆盖在景象上，让人在道路转弯处摔倒的黑暗。当黑色从天空脱落，它便不再那么纯粹，它最终会减弱，被半明半暗的色彩代替，甚至连空中的云也变得非常厚，云层沉沉，密不透光，无法屈从于天空的黑暗。它们使这黑暗模糊不清，使天文学家无法观察到恒星，使完美的黑色蜕变为简单的暗淡：

一阵风从漆黑的天空降临，像是在原始的混乱中，用一种不为人知、无法名状的材料制作的稠密厚重物搅动起悲哀的波浪，最终露出梦魇般的沉重灰色云层，在整个风景区上方飘浮着。（朱利安·格拉克，《阿尔戈古堡》，1938年，146页）

说到底，只有辽阔的海洋能够汇集夜晚很大一部分的黑暗，而不将这黑暗表现出来。孤独的水手在大海上可以看到反射在海浪上的星座随波荡漾，而这始终是真实光线的反射。

巴什拉在他的著作《空气与梦幻》中，书写了关于星座的诗。他在诗中解释道，只有幻想可以赋予星座生命，因为古代的天文学家将这些

发光的点连在一起，勾勒出一些神话人物的轮廓，而事实上，这些发光的点没有任何关联：

在蔚蓝的夜晚这个巨幅图画上，数学家用他们的遐想描绘出图样。星座都是假的，都是美妙的错误！星座将这些完全互不相干的星体连接在同一个图像中。在这些真实的点之间，这些如同孤独的钻石一般的星体之间，关于星座的遐想画出了想象的线条。（巴什拉，《空气与梦幻》，202页）

在恒星和更为遥远的星系之间没有真实的联系。需要多情的遐想才能将空间弥合，让星座穿过无边的黑暗描绘在夜空中。巴什拉想象了一个浪漫的场景来描绘它——一个牧羊人和他的伴侣一起欣赏着夜晚的奇观：

年轻的牧羊人啊，你在梦中用手轻抚的白羊，就在天上呢，它正在无边的夜晚里轻轻地转着！你明天能再看到它吗？把它指给你的女伴看看。你们两个开始画吧，这样就可以认出它，熟悉它。你们两个要相互证明你们看到的是相同的画面，有着相同的向往，你们在同一个夜晚，同样的夜的寂静中，看到了同样的幽灵经过。当梦与梦结合时，生活将变得如此丰富。（巴什拉，《空气与梦幻》，203页）

然而夜晚的画面，与所有伟大的画面一样，都可能被颠覆。黑色是多情梦想的庇护者，但也是深度焦虑的埋伏者。黑色的夜晚是双重性的，它可以转换成自己的对立面，它既残忍又温柔，时而危险又时而欢快，它可以是闪光梦境的温柔的孕育者，也可以是难以名状的阴森噩梦的制造者。

黑的选择

这个双重性首先关系到梦想的夜晚。为了欣赏真实夜晚的黑，发现它准确的明暗变化，需要在晴朗的天气下，远离城市，抬眼望向这深不可测的天空，这骇人的夜晚，让自己随着它慢慢飘移。有一个著名的佯谬：为了感受黑色的夜晚，需要度过一个不眠之夜，不睡觉，一边凝视天空，一边思考。虽然黑无法从实体上获得无穷的结构，但是它既非中性，也不贫瘠，它无法被我们全然认知。夜晚不可避免地提醒我们意识到个人生命的微不足道。它的黑暗可怕而强烈，如同“缺失”一般。

这个可怕的黑暗侵袭着我们，有时像布莱兹·帕斯卡[8]一样带给我们恐惧，很明显，这是光的缺失，也是爱的缺失。夜晚的天空充满了孤独。没有月亮的夜晚，孤独的重量变得不可承受。在漆黑的夜里，孤独成为绝对，黑暗让人窒息，每一颗恒星都被孤立。它们不计其数，却也成为枉然，它们都是孤独的。面对漆黑的夜晚，就像是面对死亡的画面，体会失去亲人的悲伤。很多诗人将夜晚的黑暗与寂静、寒冷、空虚和其他关于缺失的隐喻做类比。维克多·雨果（1802—1885）描写过对无尽黑夜的极度不安：“他们在哪儿，那些沉没在黑夜里的水手？”（维克多·雨果，《诺克斯海》，1836年）反之，如果月亮在，守护着我们的梦，黑暗会将我们带入一种相较明媚的忧伤中，仿佛它只是一个梦想的盒子，而夜晚是柔和的梦编织成的布。月光是微弱的太阳反射光，它改变了黑暗，而恒星的光却让这黑暗更加强烈。

最终，夜空的黑暗稍微缓和了一些：银河的薄纱横贯苍穹。埃拉托斯特尼[9]说，赫尔墨斯让赫拉克勒斯吮吸赫拉的乳房，这样赫拉克勒斯就可以不死不灭，但是，当赫拉女神发觉后，她拒绝了赫拉克勒斯这个宙斯的私生子，剩余的乳汁从她的嘴里流了出来。后来，其他的神话里讲到，最后赫拉和赫拉克勒斯和解了，赫拉也接受了他。对于天文学家来说，这个乳白色的圆圈勾勒出银河的地图；对于博学的诗人来说，它构成的是一个承诺：具有母性温柔的女神没有完全背弃对无尽的黑暗空间的承诺。

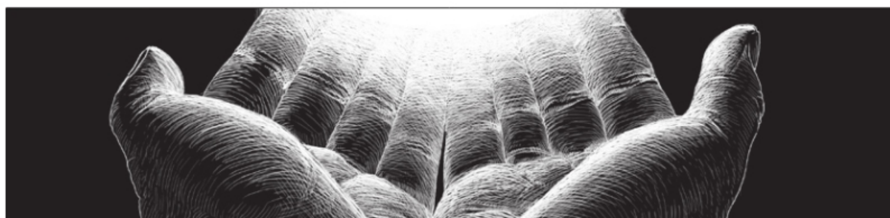
最后，正在思考的人感受到，有一类懦夫在逃避着彻底的黑暗。如雨果所写：“不思考的人生活在盲目中。思考的人活在黑暗里。我们只有黑的选择。”（《威廉·莎士比亚》，第五卷）从某种意义上来说，夜晚必须是黑色的。只有这样，才能在黑暗的最深处安放焦虑或恐惧、平静和冥想，从而忘记每天的烦恼。我们几乎可以从中预言一种道德的必要性。当我们置身黑暗，夜晚让我们不好的一面展现出来，它将我们交付给此刻，让每个人意识到自己是孤独的，让每个人判断自己的行为，发现自己存在的意义：伊曼努尔·康德（1724—1804）在他的《实践理性批判》（1788）中写道：“有两件事让我充满了赞赏和敬佩之情：我头顶的星空和我心中的道德规则。”《实践理性批判》这本书是道德哲学著作的里程碑之一。黑色的天空提醒着我们死亡的不可抗性，它告诉我们

如何让生命像恒星一样发光，就是通过自由赋予我们脆弱的生命以意义。如果夜晚没有那么黑暗，我们就失去了一种充满魅力的、深刻的、情感上无法估量的美学体验，也失去了一种基本的存在感。

对于“夜空为什么是黑色的”这个问题，哲学家以一种目的论的方式来回答：“天空是黑色的，是为了让我们看到星星。”这个回答让天文物理学家感到可笑，只能说这样的答案是目的论，属于道德领域。即使黑色的天空让人不安，这种不安也是从属于自我意识的，是一种自由，当世界上所有事情变得不可控甚至让人绝望时，这种关于自由的确定，是我们即使独自面对黑暗也能感受到的极大安慰。这让我们想到一位伟大的思想家在被刺杀之前不久所说过的话：

这个国家病了。暴力摧毁着我们的土地，到处都是混乱，人们陷入困惑。可我确定地知道，只有在漆黑的夜晚，我们才能看到星辰。（马丁· 路德·金，《我已达至峰顶》，1968年）

Part 2



A　黑体

看到外面一片漆黑，我们大可不必成为一道光。

——菲利普·葛洛克[10]，《猫的未来》（*L'avenir du Chat*）

19世纪末，英国物理学家威廉·汤姆森，也就是著名的开尔文勋爵，认为物理学不会再有什么新发现了，只有两片云遮挡着物理学的天空，其中一朵涉及热物质发出光线的光谱问题。学者们完成了这一现象的数学模式，与低频光的实验曲线合理地一致，接近红光和红外线。而对于高频光（蓝光和紫光）的实验则和该模式出现了严重出入，实验得出的数值比预期的要低得多。事实上，这个问题是真正掀起飓风的根源，因为解答这个问题的必要理论和实验发展促生了量子理论。

让我们从头讲起，故事发生在19世纪末的柏林。这个新帝国的首都接待了一些世界顶级的实验物理学家和理论物理学家。物理学的发展似乎达到了顶峰，当时的物理学有三个基础支柱：力学，包括艾萨克·牛顿（1642—1727）提出的引力学说；以詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（1831—1879）为主提出的电磁理论；热力学，探讨能量的不同形式以及这些形式交流和转换的方式。在法国物理学家萨迪·卡诺和英国物理学家们关于蒸汽机研究的推动下，热力学得以产生。它建立在两个原则上：

——能量的储存。根据这一原则得出，一个封闭系统内部能量的变化和对外交换的热和功的量是相等的。

——熵的增加。它解释了为什么热量总是从一个热物质向冷物质流动，而从不会出现反向流动。

热力学这个学科分为两个分支。第一个是“现象学”热力学，它主要对产热现象进行宏观描述，而不对它们的属性或微观原因做出判断。第二个是统计热力学，它是在奥地利物理学家路德维希·玻尔兹曼（1844—1906）的推动下产生的，这个分支从对一个物质的微观描述出发，通过假设分子或原子的存在（当时分子和原子是同一概念），来理解热的转化。

这一领域的物理学家们关注的一个问题是发热物体所释放的辐射，它会随着温度的升高改变颜色，开始是淡红色，然后变成鲜红色，最后变白，其目的是从发出这一辐射的物质属性出发，详细解释辐射的特征。1859年，德国物理学家古斯塔夫·基尔霍夫（1824—1887）通过将

热力学第二定律应用在一个热平衡的物体上，就这一主题发表了第一个重要结论。他证明了物体发射率（物体在一定温度下辐射的能量与同一温度下黑体辐射能量之比）与吸收比（被物体吸收的热辐射能与投射到物体上的总热辐射能之比）之间的联系具有普遍的规律：它不受物体的束缚，只和物体的温度有关。这个普遍性赋予了基尔霍夫理论一个根本意义。实际上，这个普遍性意味着一个能够大量吸收一定频率光线的物体也是在这个频率上很好的发射物体，反之亦然。这导致“黑体”概念的产生。基尔霍夫于1862年创造的黑体是一个能够吸收所有光能的理想物体。为了保持平衡，它会辐射出完全等量的光能。黑体提供了物质辐射的理想标准，这些物质或多或少是黑色的，但都不是绝对的黑。

1879年，奥匈帝国（所属的斯洛文尼亚）物理学家约瑟夫·斯特凡（1835—1893）得出了第二个重要的结论。他通过实验确定了黑体每单位面积发出的光通量与其温度的4次方成正比。正是鉴于这一规律，他通过将太阳总辐射量及其假定的表面积相关联，最终确定了太阳的温度（约5500摄氏度）。因为，太阳是一个黑体，虽然这好像和形容词“黑”的普通含义完全不符。正如文森特所说，将太阳与黑体等同是一个极具干扰性的矛盾，因为在人类的想象中，星体的光辉和灰烬、烟灰是完全相反的，但这也是产生巨大矛盾的根源。

黑体之谜

当时，最真实地重现黑体特点的方式是在炉壁上凿一个非常小的洞。从这个洞口射入的辐射光会承受炉内壁的众多漫反射，进去的光线最后在烤炉中被吸收，永远无法放射出去。这个洞和黑体一样具有完全的吸收性。另外，炉内壁在原子的热激发效应下，发射出全频辐射。物理学家们研究了从洞中透出的光线，它是由放射和吸收之间的热平衡产生的。德国物理学家威廉·维恩（1864—1928）通过同样的烤炉实验，根据温度确定了光谱的形式。1893年，维恩迎来了决定性的阶段，他从纯热力学的论据出发，根据光频（ν）和物体温度（T）计算出黑体光谱的普遍形式。这个光谱形式必须是$u(\nu,T)=\nu^3F(\nu/T)$，其中F是未知函数，只取决于光频与温度之间的关系。在固定温度条件下，将所有频次的基值相加，维恩的公式就可以证明斯特凡的定律从理论上讲是合理的。1896年，维恩又提出了一个特别的函数F，它可以导致一个与高频标准相符的频谱：$u(\nu,T)=a(\nu/c)^3/\exp(b\nu/T)$，其中$a$和$b$是实验中确定的衡量，$c$是光速。

维恩的一个好朋友，德国物理学家马克斯·普朗克（1858—1947），从1894年起也对黑体问题产生了兴趣，而他的目的有些不同。普朗克对热力学的第二原则非常着迷，他的博士论文就以此为主题，此外，他不承认玻尔兹曼关于原子的假设。通过研究黑体，他希望可以重新认识热力学的不可逆性，而这个不可逆性并不建立在这个假设上。他设想这个不可逆性和物质与辐射之间的互动相关，当时这个互动被假设为连续的，而玻尔兹曼认为这个不可逆性和微观统计效应相关。

从1895年起，普朗克就有了一个想法，将一组理想的共振器（振荡器）放置在具有完全反射内壁的空洞中，这组共振器就可以描述黑体。这些共振器是在电磁场效应下振荡的电偶极子。根据基尔霍夫的结论，由这些共振器发射和扩散的辐射的最终光谱可以让我们发现黑体定律。普朗克选择了这个模式，因为一个共振器导致的电磁波扩散是一个不可逆的过程，哪怕这个共振器是完美的，没有任何的摩擦或阻力。玻尔兹曼批评了这个模式，因为麦克斯韦的电磁公式在时间逆转的情况下是不变的。这些公式在时间上是可逆的，因此它们不会导致不可逆性的出现。两位学者发生了争论，普朗克最后承认玻尔兹曼是对的。玻尔兹曼也提出了一个建设性的意见：为了获得一个不可逆的性能，实验的进行应该像示范包含无序分子的气体演变的不可逆性一样。这就等于给普朗克的模式中加入共振器不规则运动的假设。

普朗克不认为电磁场是导致不可逆性的可能性来源，他将精力放在了热力学上。为了揭示物理学定律的真正原因，维恩的经验公式是不够的。普朗克希望只使用基本原理就可以确定黑体的光谱。他创造了一个新的模式，在这个模式中，电磁辐射的振动和共振器的振动是互不关联的。他从中得出两个结论：在大范围内，系统的演变是不可逆的；辐射

最终会变成同质的和各向同性的。他取得了一定进展，却没有达到一个令人满意的模式。

这就是在1900年之前的研究状况，在这一年有两组实验人员研究了在低频转速中的黑体光谱性能。他们得到了相同的结论：在这个频率范围内，维恩的公式是完全错误的，它没有考虑到实验数据。

1900年10月7日，德国物理学家、夏洛特堡帝国理工学院的实验员海因里希·鲁本斯（1865—1922），在普朗克位于柏林郊区的别墅里拜访了他。两位物理学家很自然地谈到了黑体问题，鲁本斯给普朗克描述了他在测量红外光谱的末端方面的最新进展：在这一阶段，能量的密度和温度成正比。在鲁本斯离开后，普朗克马上开始工作，第二天，他寄给鲁本斯一张明信片，向他建议了一个关于黑体光谱的新公式：$u(\nu,T)=a(\nu/c)^3/[\exp(b\nu/T)\text{-}1]$。这个公式遵守在低频辐射中（在红外线中）能量和温度的比例限制，又与关于高频辐射的维恩公式相结合。当晚，鲁本斯和他的同事费尔迪南·库尔鲍姆（1857—1927）又做了一些测定，发现它们在所有频次上都和普朗克的新公式完全相符。几天后，10月19日，普朗克在柏林将这个算法介绍给德国物理学会的同事们。

普朗克如此迅速地获得这个算法，并非偶然，也非灵光一现。在他之前发表的文章中，他就已经得到了几乎所有的数学方法和概念。至于他的新公式，他只是在维恩公式和另一个英国物理学家瑞利男爵约翰·威廉·斯特拉特（1842—1919）的公式之间做了一个插入法。1900年6月，瑞利男爵提出低频光谱的公式：$u(\nu,T)=8\pi(\nu^2/c^3)kT$。然而瑞利男爵的公式也遇到了物理学中反复出现的问题：将所有频次的基值相加，会得到一个无限的总能量。1911年，奥地利物理学家保罗·埃伦费斯特称这个结论为“紫外线灾难”。普朗克在自己的介绍中，完全没有提到这个不足之处，也没有提到瑞利男爵的结论，因为他不接受原子论假设。可是，普朗克对这个结果并不满意，因为他总想从最初的理论推导出它来。1920年，他在颁发诺贝尔物理学奖的演讲中解释道：“即使辐射的公式被证明是完全正确的，它也只能是通过幸运的臆想得出的插值公式，这无法让我满意。从发现这个公式起，我就竭力给它一个真正的物理学的解释，这让我跟随玻尔兹曼的观点，思考概率与熵值之间的关系。”

为了获得他所希望的更为基本的理由，普朗克别无他法，只能借助于玻尔兹曼的统计法，虽然他始终反对原子论假设。他引入了一个理念：共振器的总能量被平分为能量ε，这个能量与它的频次ν成正比（$\varepsilon=h\nu$）。所以，尽管共振器和辐射拥有持续变化的能量，但它们之间的交换是通过小量化包完成的。在这个公式中，比例因数h是物理学中一个新的常量，它不是被立即当作基础常量的。事实上，普朗克明确拒绝和玻尔兹曼一样以现实的方式来解释这个常量，而玻尔兹曼在假设原子存在的前提下，证明了常量k。尽管如此，在“绝望的行动”中，（普朗克说：“因为我有意识地远离了原始状态。”）他引入了与能量和频次

相关的常量并称它为“h”，它是“hilfe”（德语里“ 救命”的意思）的首字母。这让他可以验证自己的公式，并确定了凭经验引入的常量的值：$a=8\pi h$和$b=h/k$。他得到了如下光谱：$u(\nu,T)=8\pi h(\nu/c)^3/[\exp(h\nu/kT)-1]$。几周之后，1900年12月14日，普朗克将这个公式呈交给柏林学院。对比普朗克提出的第一个公式，我们会认为他所做的只是一个简单的符号性变化，而事实上，这是一个真正的概念性跳跃。

常量h很快就成了量子物理学的象征，普朗克的研究也促进了量子物理学的发展。1905年，年轻的阿尔伯特·爱因斯坦（1879—1955）撰写了好几篇具有革命性的文章。他的第一篇文章，可以说比普朗克自己都更为认真地研究了普朗克的理论。爱因斯坦认为，光不是一个连续的现象，而是由各种能量粒子传递的，这些能量粒子后来被命名为“光子”。这使他可以合理地解释海因里希·赫兹 （1857—1894）于1887年发现的光电效应。因此在一定环境中，光是一个微粒的结构，而不是波状的结构，从这个意义上讲，光是由一些不可分解的小团组成，这些小团携带的能量与频次相关。这一发现，以及证明原子存在的实验，是20世纪初量子革命的开端。

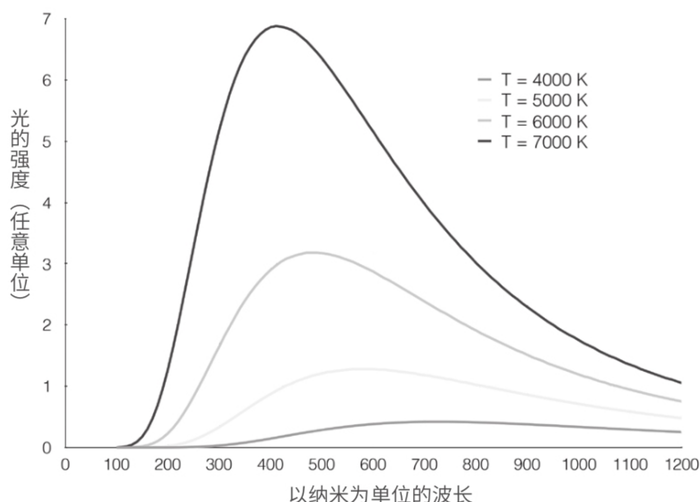


图3.黑体光谱的形状仅取决于光源的温度。当温度增高，曲线下的面积增大，曲线的最大值向短波方向移动。

因此，解决黑体辐射之谜的方法是一场颠覆几近完美的古典物理学的冒险，而走向了令人惊讶的、意想不到的量子世界。开尔文勋爵认为，这只是一朵很快会被吹散的云彩。普朗克认为，这是一种痴迷，会使他违背自己的信念。爱因斯坦认为，这是用来发现关于光这个最有趣现象的工具，是粒子和波的概念的融合。

黑体是真实存在的吗？

计量学需要一些能够尽可能完全模拟理想黑体发射的设备，理想黑体的发射率要接近1。超黑就是这样一种材料，它是通过化学侵蚀镍磷合金的表面而制成的，并且只能反射0.4%的入射光。另一种解决方案是将碳纳米管垂直排列在硅表面：合成材料可以吸收99%的入射光，从紫外线到红外线。最终萨利纳米系统公司将纳米碳管黑体投入市场，这是一种能够吸收99.8%的入射光的可喷涂颜料。英国艺术家安尼什·卡珀尔（1954— ）是唯一将这种涂料应用在艺术作品中的人。

正如我们关于太阳所说的，一些恒星光谱的连续部分和黑体的光谱几乎一致。然而，在恒星内部产生的放射和吸收的组合作用会在物体表面放射的光谱中，以第一近似的方式，强加一个与不同内部层级关联的黑体的组合。因为较深层级的温度更高，所以它们比较浅层级发出的光更多，但是也被吸收得更多。也正因如此，每个层级的光谱必须乘以吸收率这个权数。所观测到的光谱是所有基值的总和，因此没有任何先验的论据可以证明它和一个黑体光谱是相似的。但是对于太阳来说，我们接收辐射的区域厚度约为500千米，远小于太阳半径（约696000千米）。因此这个光圈的温度相对均匀，这使得黑体光谱和太阳光谱有充分的近似性。于是，我们将一颗恒星的有效温度定义为一个黑体辐射出与恒星等量能量时的温度。那么，太阳的有效温度就是5770开尔文，即5500摄氏度。

最冷的黑体

20世纪60年代中期，两位美国无线电天文学者阿诺·彭齐亚斯（1933— ）和罗伯特·威尔逊（1936— ）发现了一道仿佛来自天空各个方向的辐射。令他们惊讶的是，这道辐射的存在是1948年俄裔美国物理学家乔治·伽莫夫（1904—1968）所预言过的。考虑到宇宙的扩张，伽莫夫猜测这道辐射一定是在一个比现在密度更大、温度更高的阶段出现的。如果过去宇宙的温度已经达到几千开尔文，那么这个物质就完全被电离了，而光则随即在自由电子上扩散。那时光的传播不是直线形的，而是曲折的。和降压膨胀的气体一样，宇宙的扩张会稀释和冷却宇宙中的物质。当温度降至3000开尔文以下，电子就可以和质子结合，形成第一批中性氢原子。那时宇宙已经存在了38万年。在那一刻，光可以以直线的形式，在变成透明的宇宙里自由传播。通过这样的设想，伽莫夫预测，在宇宙变透明时占据优势的辐射，如今依然充斥在宇宙中。然而，由于宇宙的膨胀、稀释和冷却，这道辐射的能量已经比起初衰弱了。彭齐亚斯和威尔逊发现的这道辐射轻松地证明了这一点，这一发现也让他们获得了诺贝尔物理学奖，因为这一发现有力地证明了宇宙扩张学说。这道原始辐射是由一个温度约为3000开尔文的物体发出的，现在可以通过温度仅为2725开尔文的微波形式感知。它被称为“宇宙微波背景辐射”，几乎和我们的宇宙同样古老，它为我们描绘了宇宙在中性氢原子形成时的化石图景。1992年，COBE卫星（宇宙背景探测者）对宇宙微波背景辐射进行了第一次精确观测，WMAP（威尔金森微波各向异性探测器）和“普朗克”探测器也分别于2005年和2013年对这道辐射进行了观测。这道辐射的光谱几乎和黑体的光谱完全吻合，最大偏差仅为0.005%。根据定义，这使得宇宙微波背景成为被观测到的最完美和最大的黑体，并且极有可能是最冷的一个。

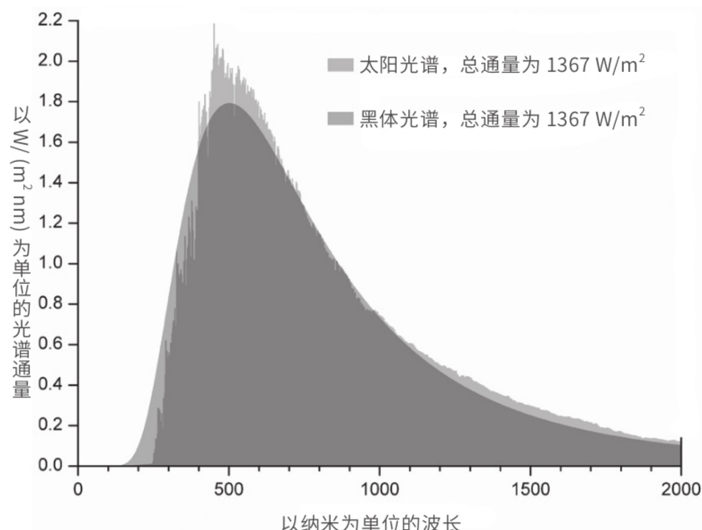


图4.太阳光谱与温度为5770开尔文的黑体的光谱非常近似。

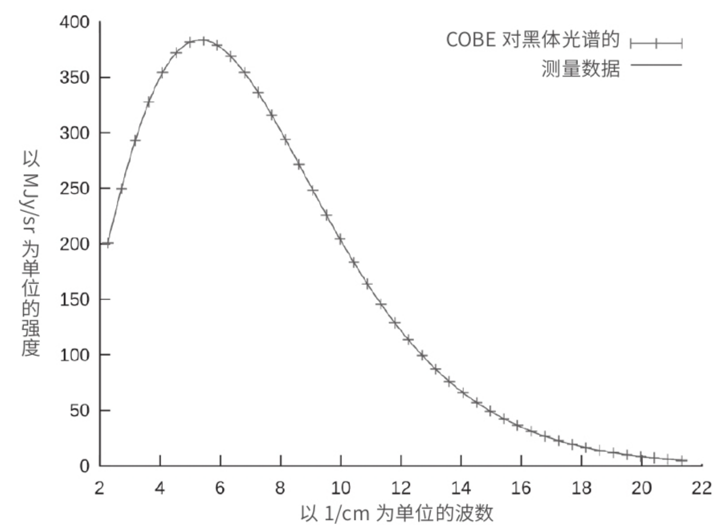


图5.COBE卫星于1992年获得的宇宙微波背景辐射的光谱。这个光谱和温度为2725开尔文的黑体光谱几乎一致。





B　黑体辐射

不再需要任何颜色，我只想将它染黑。

——滚石乐队[11]，《将它染黑》（*Paint it black*）

在“黑体”这个科学表达中，形容词“黑”的含义似乎并不成问题：难道它不单纯指物体的颜色吗？实际上，这个黑暗只是用黑色来做个类比。一个物体的颜色是与其表面反射或扩散的波长相符的（颜色也可能与物体的微观结构有关），而光的其他成分则被吸收了。一个白色的物体是反射了所有可见光的波长，而一个黑色的物体则是将这些波长全部吸收了。因此在太阳光下，一个黑色的物体比白色的物体更容易吸收热量。但是这个著名的特性与物理学家所说的黑体特性之间存在着巨大差异。物理学家称之为“黑体”，是因为它会吸收电磁光谱的所有光频，而不仅仅是彩虹上颜色的光频：黑体吸收了整个光谱，其中包括肉眼看不到的紫外线、微波等光频。黑体是完全吸收剂。它的黑暗不再是表面的、根据光照而改变的色调，而是它的本质属性、它的定义所在。这个黑暗中还要加入黑体的另一个特点：为了保持平衡，黑体必须以辐射的形式将它所吸收的光频释放出来。

黑体不再属于有色物体构成的经验论世界，而属于物理理论知识：它是一个近似真实物体特性的模型，而这些真实物体通常是灰色的，也就是说，它们会反射一部分吸收的电磁波。黑体是一种理想物质，它的黑暗是非同寻常的。物理学家创造了一个新词来准确地形容它：blackbody。这个词通过将形容词（black）和名词（body）相结合，把它们从普通语言中剥离出来。我们的语言并不完全适合描述这个事物（或许可以将它翻译为“corps-noir”），除非需要突破普通语言的限制。为了探索这个从黑中想象出的事物，仅仅靠编制直观的隐喻是不够的。我们不应该止步于这种简单的一语双关：我们所说的黑色不是表象的黑。巴什拉对于黑体客观认知的精神分析需要深入研究黑体的物理学特性，也就是它的完全吸收能力和它的辐射的物理学特性。

如罗兰之前提到的，关于黑体的一个比较好的实现就是一个烤炉，从壁上凿一个可以吸收光的小洞。第一部《法兰西学院辞典》（1694）中就有了这个习语：“烤炉中是黑色的。”它指的是内壁覆盖着烟灰的烤炉的黑色，而这与一个关于黑体的相对准确的直觉相一致。烤炉开口内的空荡是将黑体现实化的一个比较完美的方式，但这只是一个近似性的方式，甚至在某些地方会出现错误的图像，如何能通过内壁覆盖着烟灰的烤炉的图像来理解太阳是一个黑体呢？烤炉和太阳的对比，就像是轻

轻的灰烬和厚厚的岩浆之间的对比、普通感官和科学思维之间的对比。太阳可以吸收所有辐射并把辐射以热能的形式释放出来。太阳不是黑色的，却是一个黑体。这就是一个普通感官和理性思维之间出现失调的典型例子。

然而，我们确切地知道，当烤炉不是静止的（黑暗的），而是处于开启和运转状态（明亮的）时，我们无法辨识出烤炉里的东西，“和在烤炉中一样黑”这个习语变得很恰当，甚至完全正确。不仅烤炉的亮度让人目眩，烤炉中的物体也像黑体一样运动，也就是说，烤炉的内部会将光线全部吸收和释放，以至于我们无法辨识里面的东西。让·佩兰在他那本有预见力的书《原子》（1913）中是这样解释的：

如果我们从洞口处向里面看，我们在内壁上辨识不出任何细节，我们只能感受到一个光的旋涡，除此我们什么都看不到。假如我们通过一个炽热的熔炉上的小孔来观察里面正在熔化的金属，我们不可能看到熔液的水平面。这说明，不只是在低温下，我们无法辨识烤炉中的物体。（《原子》，151页）

因此，黑体不再是一个漆黑的缝隙，而是一个光明的使人目眩的深渊，一个“光的旋涡”。然而在任何情况中，黑体都会吸收光线，它的特点是它的吸收性和它的不可见性。这个深渊似乎不是一种物质，然而它并不缺少物质，因为必须有一种物质来吸收光，但仿佛黑就是自己的物质组成部分。巴什拉发现，在所有颜色中，黑色是在想象中最重要的，是唯一确实稳定的：“诗人冥想出一切物质的颜色，其中黑色被看作是最稳定的，它否定了所有可以触及光线的实体。”（《土地与对静息的遐想》，1948年，35页）黑色代表着物质性的去除。将这一直觉深化，我们发现，在想象中，黑位于一切事物的核心地带，它象征着物体本质的隐藏，物质的封闭。

物体的暗黑性

然而，物体的不透明性不代表它们对光没有反应。黑体吸收光线，受到这种能量供应的影响，它的温度会升高。这时，它必须通过辐射释放出影响它自身平衡的能量。因此，黑体接收所有的光，它的内部发生了一些变化，然后它将光线以不可见的辐射形式释放出来。它像是一面非常奇怪的镜子，它会将自己接收到的东西进行吸收和转化，然后再把它们释放出来。其他的颜色没有这种暗黑能力，它们只是反射光，是一些表面的能力，缺乏深度的转化。黑体的部分反射遮盖了完美的黑的隐蔽活动。巴什拉强调，这个直觉由来已久。阿那克萨哥拉[12]说过："与我们眼睛所看到的不同，由水构成的雪是黑色的。"这个直觉建立在想象的、推翻原本价值观的快乐之上。中世纪的人们希望外表雪白的天鹅内里是黑的。很多作家都支持这个辩证的看法，他们热衷于发现隐藏在彩色虚假外表下的隐秘的黑。奶白色就是这个假象的加强版："如何更好地表达隐秘的黑色，一个虚假的白色物体中隐藏的罪恶……月光下乳白色的水中隐藏着死亡的隐秘黑暗，带着香脂气味的水有墨水的余味，毒药的辛辣。"（《土地与对静息的遐想》，31页）然而，被逐渐消退的颜色背叛的恐惧只是关于暗黑想象的一种特殊色调。黑体在存在与表象之间保持着更为中性却同样矛盾的关系：它拒绝通过光反射的形式显现，又用尽全力向四周放射出光线。

黑射线

诗人亨利·米肖（1899—1984）描绘的一些幻觉现象，如“黑幻觉”，或者某些梦中的妄想，表明了物体的暗黑辐射倾向。哲学家莫里斯·梅洛-庞蒂（1908—1961）在他的著作《知觉现象学》中，用一段非常有趣的文字分析了这种直觉（因为它绝非现象学上的，最终也无法回归到任何真实的知觉上）：

我说我的钢笔是黑色的，在阳光下我看到它是黑色的。但是与从物体中发射出的黑暗能量相比，这个黑并不明显，即便当它被光线覆盖，也只有在精神的黑暗中才能被看到。真实的色彩始终隐藏在表象之下，如同背景始终在图像之下，也就是说，它不会被看到或者被想到，而是一种非感官的存在。（莫里斯·梅洛-庞蒂，《知觉现象学》，1945年，352页）

根据这个奇怪的描述，当黑暗超越感知时，一个确定是黑色的物体必须无声无息地发光。对于一个像梅洛-庞蒂这样严谨的哲学家来说，让自己进入一个这样的猜想，“辐射的黑体”形象必须是非常强大的，并且它的“黑暗力量”必须对一种深刻的无意识的必然性做出反应。于是，一个关于感知的错误现象学成为一个关于黑体的虚构的准确的精神分析：因为是黑色的，它的黑钢笔躲过了光的运动，黑暗扩散开来。想象力开始在光和暗之间进行角色的反转：在我们最可怕的梦魇中，是不是黑暗在扩散，驱赶了光明？这个可怕的幻想在亚历山大·尤杜洛斯基（1929—　）和莫比斯（原名尚·吉罗，1938—2012）共同创作的系列连环漫画L'Incal中被赞赏：在这个漫画中，一个“影子蛋”吞噬了星星，通过星系传播一种奇怪的黑色的黏稠的辐射，一种会让宇宙陷入黑暗的黑潮。

因此，黑体辐射不仅仅对于物理学家来说是一个谜，哲学家也同样试图理解这样一个反自然形象是如何产生、扩大，并且获得了一种精神认知，以致它变得黑暗或者吓人。也许这是一种类似于第一次接受罗夏克墨迹实验时，形成的“黑色撞击”效应？测试看似非常简单，人的主观性以及神经官能都从中反映出来。想象的黑色光线为类似的原因而烦恼：通过侵入精神空间，它迫使意识思考在无意识深渊中来回摆动的无形事物。巴什拉强调，一个懂得使用黑色的隐秘膨胀作用的画家，可以以一种非常节省的方式激发深刻而活跃的情感：“于是，一个深刻而复杂的黑色墨点，当它从深处显现出来，就足以将我们置于黑暗的境地之中。”（《土地与对静息的遐想》，90页）这是我们的语言中一种诱惑而神秘的表达：一个辐射扩散的黑体将我们置于“黑暗的境地之中”。黑色的图像出现在如此多的画家和插画家的作品中（我们会从弗朗西斯科·戈雅联想到雨果、奥迪隆·雷东、弗朗坎等），事实上，它们拥有惊人的灵活性和不可思议的能力，可以展现出被压抑的过去的形象，也可以通过扩张来侵扰我们的精神。这种活力使它们既迷人又危险。它们的力量来自想象中的元素，与火、水、空气和土地一样强大而原始的元素：它

们在黑暗中展现出来。黑暗元素是一种运动的物质，一种膨胀的移动力量："所有的黑暗都是流动的，因此所有的黑暗都是物质的，这也是对夜晚的梦的物质思考。对真正的梦想者来说，一个阴暗的角落就可以召唤出对浩瀚夜晚的所有恐惧。"（《土地与对静息的遐想》，91页）对于黑体来说，这种物力论是准确的：内部的黑暗既有吸收性，也有放射性。它不像普通意义上的黑暗一样与光对立，它会吸收光，消化光，最后霸占光的放射力。

这种辐射不是在物理空间中传播，而是在意识空间传播。从此，黑体的形象不再以其与外部光线的辩证为特征，而是成为穿透内部意识的黑光源。已故的格贝（即乔治·布隆多，1929—2004）用两幅充满讽刺、形而上学的漫画，描绘了这道"黑射线"，当我们的意识从一些偶然的想法中解放出来，我们的意识就会发出这道"黑射线"。这个笑话的精彩结尾（在连环漫画《我在这里做什么？》中）是，人类最伟大的天才设想——黑射线几乎要穿透宇宙的神秘之处，却在最后一刻被一只身上写着"E＝MC2"的兔子拦住了去路。爱因斯坦进行了一个聪明的设想，而不是加深自己盲目的直觉。可谁又有勇气在黑暗中走得更远呢？

皮埃尔·苏拉日[13]的绘画演变说明了这种会吞没意识的黑射线的扩张力量。从1954年起，黑色开始侵入画布的表面。虽然画家好像长久以来都想抵抗，尤其是通过刮擦的技术，消除表面上已经侵入的黑暗，还引人猜想它经过的痕迹。但这似乎无法瓦解整个黑的支配作用，它令人不安的辐射可能会带来光的缺失。同其他颜色相比，苏拉日始终把黑暗看作珍贵的光的缺失："它缺少最浓烈、最强烈的色彩，而这种浓烈和强烈感被赋予了其他颜色，甚至是白色。"（皮埃尔·苏拉日于1963年与皮埃尔·施耐德的谈话）直到1979年，他才完成了自己的第一幅黑色单色画。艺术家皮埃尔·安珂勒维（1939—　）解释说，应该超越将黑暗与光线对立的传统观点："只要光与暗的对比支配着绘画，即便画布上有黑色的出现，绘画作品中的鲜艳的色彩也会威胁到它，因为此时黑色只有在同光线的比照中才能展现绘画的力量。"（皮埃尔·安珂勒维，《因为》，2009年）对于一些评论家来说，这个改变取决于最终承认黑色是一种颜色的事实，以及黑色不是捕捉光线，而是通过它的质地和光辉来展现自己。然而，这种表面的反射并不能解释黑色对画布空间的决定性的整修。单色画的真实辐射在于黑色那种隐秘的超越，当它侵入整个画布并使形态模糊不清的时候，这种超越就会显露出来。当画家不再惧怕会在这种创作中失去个性时，他画出一些黑色，这些黑色不再面向欣赏者的感知意识，而是面向无意识的黑暗旋涡。为了转换为全黑的光彩，意识必须委身于黑暗的元素，而且要知道，意识与意识的内容，两者的区分会彼此消除。这对于本身就很微妙的哲学直觉来说是一个难以理解的公式。对于一个研究黑体辐射的物理学家来说，它一点也不比计算活动量子的公式简单。

黑射线

CE RAYON NOIR



"发射束流"是一个更为贴切的术语，我们为了使用方便，则称之为射线。

我们把这条射线定性为黑色，其目的是为了将它显像化，就像我们会给消失在土地里的水流染上颜色，以便发现它们的再次涌现。

当整个身体最大限度地集中注意力，进行强烈的新陈代谢时，这种非思想的束流从大脑的中心迸发，刺穿鼻根上方的前额，饱含正义感地贪婪地向前冲去，试图连接到那些我们迫切需要验证其存在的未知思想的星系。

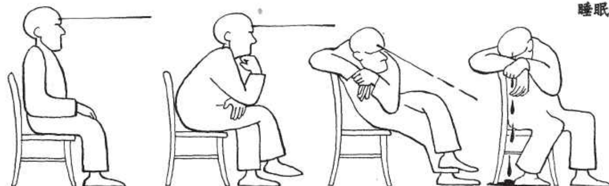
大脑像一个发电机一样全速运转。

没有任何规则。一切都是流动的。在这个轨迹的尽头是绝对的知识。

这就是黑射线。

但是……

第一个障碍



第二个障碍





构成圈套的事物：

散放的报纸或者书，所需穿过的厚度需要重新计算，书的外包装一端超过了黑射线的传送范围，等等。



图6. “黑射线”，摘自格贝连环漫画《我在这里做什么？》巴黎，达戈出版社，1983年，50—51页。

潜意识的黑暗意识

1894年，就在马克斯·普朗克发现“黑体辐射不连续”的这一年，保罗·瓦勒里[14]撰写了《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》。在这本略显年轻气盛的书中，他企图把自己放在天才列奥纳多·达·芬奇（1452—1519）的位置上。25年后，他又添加了一些不那么狂妄却同样深刻的评论。他最初那种想要揭开达·芬奇作品的设计之谜的想法，被试图澄清赋予这些作品意义的非个人意识的愿望所取代。他认为，意识之谜绝对是一个“黑体”。因为意识是吸收一切的东西，却不能显现自己的光。意识是意向性的，引用让-保罗·萨特（1905—1980）的话说，它属于“意识的东西”：我们只有通过意识才能和事物有精神接触，但同时意识也与这些事物存在距离；因此，它总是能够将自己与自己所照亮的东西区分开来，而无法照亮自己。自我意识与意识不可能同时发生又相互区分。仿佛有一种“注意量子”，将意识与意识的内容分开，不可解决的不连续性。因而，意识可以带给我们一切，却不包括意识本身：“这不再是一个吸收一

切却什么都不给予的黑体。”（《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》，102页）

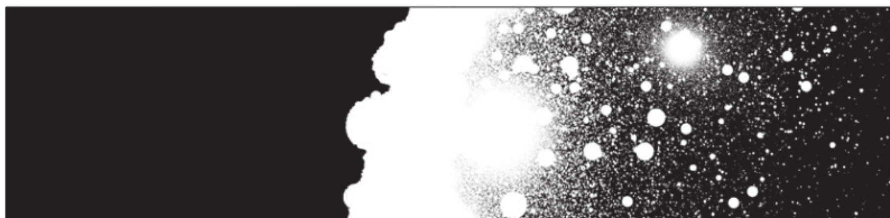
为了掌握意识本身的概念，瓦勒里在冥想中进行了一种类似被现象学家埃德蒙德·胡塞尔（1859—1938）称为“悬置”的活动，即中止自然的现实主义行为。意识必须要停止对意识之外存在的依赖，才能确定意识的组成部分。胡塞尔和笛卡尔一样，都开始去除自己意识中世俗的内容。通过剥离所有的内容，意识发现自己的意向性结构，也就是说，它只是思想内容（“思想”）和物体目的（“思维”）之间的关联。瓦勒里没有关注这一点，而是完成了一个“悬置”来揭示意向性结构。最终，意识作为必要存在，只包括“两个本质上未知的主题：自我和X”（《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》，102页）。同时，他发现了他的意识的“裸体”，这是世界和他的身体之间脆弱的接触面。将注意力转向意识本身，转向意识构成的黑体，他发现，栖身于意识的黑体通过意识来显现：

存在无法自我欣赏，只能欣赏对面的景象。然而，存在感到自己构成了整个夜晚，这个喘息的、被定了方向的夜晚。所有完整的夜晚，狂热的夜晚，静谧有序的夜晚，都是由一些自我约束或自我压抑的有机体组成；夜晚充斥着黑暗，而在这黑暗中，身体器官按照自己的属性，跳动着，呼吸着，发热着，守卫着，在自己的位置上完成着自己的职责。（《列奥纳多·达·芬奇的方法引论》，105页）

换言之，无法看到真相的意识不会凭空消失，它明白为什么自己既不在意识之内也不在意识之外。它是一个透明介质：在作为外部世界意识的同时，它意识到使意识产生的身体的无意识存在。瓦勒里的自我意识并不像现象学家胡塞尔的那样理想化：意识知道自己是身体与世界的连接点。它可以暂时接受自己无法看到真相，失去知觉，让自己的目标消散在模糊的黑暗中，从而回到身体与意识之间隐秘的、原始的模糊之中。在日常生活中，这是每个人都记得的童年经历（长大后的情欲体验）：当我们陷入黑暗，意识不再飘浮在我们的身体之上，不再被束缚着，而是成为身体本身，成为恐惧，成为欲望。也许直觉会回溯到更久远的时候，回到在母亲腹中的时空，回到最初的黑暗的温暖中。

无论如何，关于黑体辐射的想象实验的深层含义似乎是要激起一个矛盾的自我意识：它没有在事物的意识中忘记自我，而是成为意识本身，因为它无法分辨任何东西，于是它在成为别的事物的意识之前，意识到了一个黑体的辐射。苏拉日的作品《黑色之外》（*Outrenoir*）利用的就是观看者的无意识，让观看者停留在这幅作品前，任自己被带入黑暗之中。在观看者与黑暗的交流中，在陷入黑暗的感官愉悦中，在黑色辐射带来的温暖中，意识与源自无意识深处的黑暗力量达成了新的平衡。让-克洛德·菲力和约翰·克莱德·费罗通过自反而有趣的展示（反复展示），正确使用单色画将两个黑体和画布展现在观众眼前。

Part 3



A　黑洞

黑洞既不是洞，也不是黑色的，它的边缘是灰色的。

——米歇尔·卡斯[15]，《光明中的黑洞》（*Les Trous noirs en pleine lumière*）

1783年，英国物理学家、天文学家，可敬的约翰·米契尔（1724—1793）给皇家学会写了一封信。他在信中提出了一个质量大到光线无法透出的星体的存在。他还假想了一个定位这种星体的探测原理：“如果某个发光体围绕它们旋转，我们根据这些旋转体的运动，就有一定的可能性推断出被作为旋转中心的物体的存在……”1796年，皮埃尔-西蒙·拉普拉斯（1749—1827）在他的《宇宙系统论》中独立地做出了相同的猜想：“一个与地球密度相同、直径比太阳大250倍的发光星体，由于它本身的引力，它的任何光线都不能传到我们眼中。”而他的这个理论和他的前辈的理论一样，并没有获得认同，因为在同时，英国物理学家托马斯·杨（1773—1829）和法国物理学家奥古斯丁·菲涅耳（1788—1827）进行了光的干扰实验，这些实验证明光是一种没有重量的波，因此不受引力影响。然而，在18世纪末被命名为“封闭星体”的这个概念，在20世纪有了“黑洞”这个新名字，并且随之名声大振。

黑洞是什么？

我们都知道，一个被抛向高空的球在达到最大高度后会最终落地，抛球的力气越大，球的高度就越高。这是地球重力的一个表现，因为地球的重力会将所有的东西向地心拉去。球的高度会随着初始速度的平方增加：抛球的速度快两倍，球的高度就是原来的四倍。如果抛球的速度足够快，超过每秒11.2千米（约每小时4万千米），球就不会再落到地球上，而是会彻底摆脱地球的引力。只有行星际探测器的发射器才能达到这个足以摆脱地球引力的速度，让我们可以看到我们身处的太阳系。这个逃逸速度与行星的质量和半径的商的平方根成正比，一个比地球大4倍或小4倍的行星的逃逸速度会是地球的两倍。光的速度约为每秒30万千米，拉普拉斯算出，为了让光线无法逃逸，一个与地球密度相同的恒星的半径应是太阳半径的250倍。显然，拉普拉斯公式只适用于经典物理学中的物质抛射体，不能先验地适用于粒子，即光子，质量为零的光线。

关于引力对光产生影响的缜密研究必须在爱因斯坦于1915年发表的广义相对论的框架内进行。这个理论指出，引力的作用实际上是时空的几何表现，它本身是建立在物质和能量分配之上的，时空因它而变形、弯曲了。自由运动的粒子必须沿着新几何中较短的线，也就是短程线来运动。因此，与经典理论相反，光虽然没有质量，但也会受引力影响，或者更准确地说，是受时空的弯曲影响，它的轨迹在一个巨大的物体附近会偏转。英国天文学家亚瑟·爱丁顿（1882—1944）在1919年的日全食期间首次验证了这一效应。在日全食期间观测到的接近太阳方向的恒星的位置与在一段时间后测量到的这颗恒星的位置之间存在着微小差异，这和爱因斯坦的计算完全相符。这是对于他的万有引力新理论的一个有力证明。今天我们知道，爱丁顿使用的实验器具太不精确了，以至于这个观察结果并不是真正有说服力的，但是，除了这个幸运的巧合之外，科学家又多次重复了这个实验，都明确证实了爱因斯坦的预言。

如果时空的弯曲会影响光线，那么在广义相对论的框架下，我们就有可能再次计算在何种条件下，星体能够限制光线的逃逸。爱因斯坦的理论证实了一个临界半径的存在，当星体的半径小于临界半径时，光线就无法从星体中逃逸。让我们出乎意料的是，计算这个临界半径的公式与由经典理论推导出的拉普拉斯公式完全相同。这个临界半径被命名为史瓦西半径，以纪念在1915年计算出这个半径的德国物理学家卡尔·史瓦西（1873—1916），这个半径和物体的质量成正比，例如，根据史瓦西的公式，要将太阳转化为黑洞，必须将它的全部质量压缩成一个半径仅为3千米的球体！

在光线和物质无法逃逸的区域外有一个球形的表面，我们称之为黑洞的“视界”（horizon）。它是一个几何表面，不是真实物体，我们赋予它这个名称是因为它和地球的“地平面”类似，都是视线范围的边界。如

果说地球上的地平面位置取决于观察者的位置，那与之相反，黑洞的视界是绝对的。它是时空的边界，与观察者的位置无关，并且会将所有的事件分为两类：在视界面之外，通过光信号我们可以在任意大的距离之间进行联系，这就是我们居住的普通宇宙；在视界面之内，由于光线要向中心聚集，因此它们无法在任意两点之间自由移动，联系受到了严格的限制。例如，物质和辐射可以从外部区域传到内部区域，却无法从内向外传播。这甚至证明了“黑洞”这个在1967年由美国理论学家约翰·阿奇博尔德·惠勒（1911—2008）提出的术语，因为在当时这只是一个理论上的可能。惠勒是一个充满想象力，并且对最大胆的猜测也抱有开放精神的理论学家。除了“黑洞”，他还普及了很多极为新颖的概念，比如“多重世界”“虫洞”“时光倒流的粒子”，以及物质与信息之间的平行论。这些概念往往只是人们想象出的观点，但是能证明黑洞这个著名理论存在的证据出现在1971年：天体物理学家们探测到了天鹅座χ-1，这个二元系统的特征表明它是由一个黑洞和一颗巨大恒星组成的。此后，在我们身处的星系中又发现了大约20个黑洞，其中最大的一个——其质量达到了400万个太阳质量——就隐藏在银河系的中心。正如文森特在下一章中所指出的那样，有一个黑洞存在于银河系中心，这冲击着我们的想象力，但黑洞本身并不是邪恶的，恰恰相反，它有利于银河系的稳定和发展演化。2002年，我们通过观测银河系中心附近的恒星轨道，发现了黑洞的存在。2022年，视界面望远镜项目将通过结合分布在地球整个表面上的无线电望远镜的数据，来制作这个中心黑洞视界附近的图像。目前的观测还显示，在一些活动星系的中心，如M87星系，存在着一个超大质量的黑洞，其质量可以轻松超过10亿个太阳质量！

如果说黑洞确实存在，仍然需要提出一个能够解释黑洞形成的机制。恒星的黑洞——其质量至少是几个太阳质量——是由于一颗大质量恒星（约为10个太阳质量以上）的中心引力坍缩而形成的。事实上，当恒星达到硅的热核燃烧阶段时，其结实的内核的质量会增加，直到变得不稳定。恒星的内核坍缩并产生一个中子恒星，而恒星的外壳则被一个名叫“超新星”的巨大爆炸吹散。1939年，美国物理学家罗伯特·奥本海默（1904—1967）指出，如果中子恒星的质量超过3个太阳质量（兰道-奥本海默-沃尔科夫极限），星体自身的引力绝对强过所有其他的相互作用，黑洞便形成了。自此，黑洞成为宇宙大爆炸的一部分，尽管长久以来，天体物理学家的工作仅限于通过观察来探测黑洞存在的间接影响。而这一情况在2015年10月发生了变化，因为美国的激光干涉引力波天文台（LIGO）首次探测到了引力波。物理学家们在所记录的振动中看到了关于一个巨大振荡的证据。在13亿光年外，有两个黑洞，质量分别是36和29个太阳质量，它们以每秒250转的速度围绕共同的重心旋转，最终合并为一个唯一的、巨大的、质量为62个太阳质量的黑洞。3倍于太阳质量的质量差已经以引力波的形式被放射掉了。

在黑洞视界的边缘

黑洞真的是通常描绘中的宇宙怪物吗？不是的！在距黑洞的距离超过黑洞的史瓦西半径时，时空与同质量的正常星体的时空是无法区分的。因此，将太阳转化为黑洞，对行星的运动没有任何影响，而将黑洞想象成一种可以在所经之处吞噬一切的宇宙吸尘器，至少也是一种夸张。只有在黑洞视界这个界面附近，才会出现黑洞特有的时空变形。

我们在黑洞视界的附近会感受到什么？一种对脚和头的奇怪而强烈的拉伸感。你的身体有一定的空间延伸，它的不同部位探索着不同曲度的区域，这些不同曲度被解释为引力场的差异。我们也会在地球表面体验到这种潮汐力，我们可以很容易地观察到这个壮观的结果：由于太阳和月亮的相互作用，就有了海水的潮起潮落。在经典物理学中，重力的强度取决于物体之间的距离。因此，地球上靠近月球的区域比位于对跖点的区域更容易受到月亮的吸引，在地球的参照系中，这会引起海水的明显变化。我们的脚，因为比我们的头要更接近地球的中心，也更受地球的吸引；从我们的角度来看，这个吸引力是一个拉伸的力量，在地球表面，这个力量的强度非常微弱，不到你体重的百万分之一。在黑洞视界的附近，你的头部感受到的引力和脚部受到的引力之间的差异要明显得多。对于质量为10个太阳质量的黑洞来说，你感受到的牵引力就好像是你被吊起来，巴黎地区的人挂在你的脚踝上一样！而奇怪的是，黑洞的质量越小，这个效果反而越强。这个明显的矛盾有一个简单的解释：潮汐力的强度与造成潮汐力的星体密度成正比。由于黑洞的半径与其质量成正比，所以它的密度（与质量除以半径立方的商成正比）随着其质量平方的倒数而减小。因此，一个质量为100万个太阳质量的黑洞产生的潮汐力比一个质量为10个太阳质量的黑洞产生的潮汐力小100亿倍。所以，我们可以出入超大质量黑洞的边缘：“巨人”黑洞的巨大质量使得电影《星际穿越》的主人公能够进入黑洞之中。

由于黑洞存在而引起的时空扭曲还有另一个影响：当我们向远处的观察者发射时钟信号时，在观察者看来，时钟信号的频率仿佛变弱了。因此观察者会觉得靠近黑洞的时钟比自己的时钟要慢。时钟频率的下降也可以表现为发射光的频率下降：光线比发射时显得更红。

现在，如果你决定穿越这个视界面，并将你这一壮举的图像寄给你的同事，会发生什么事呢？对你来说，在这个穿越的过程中，不会有什么特别的事情发生：黑洞的边界并没有神奇之处。相反，身处视界之外的你的朋友永远看不到你穿过这个界面！随着你逐渐接近这个界面，放映的影片似乎变慢了，因为接收两个连续图像间隔的时间越来越长。时间膨胀的原理就是，几乎相同的图像彼此相连，达到的视觉效果就是你被凝固在你穿越视界面时的位置上。而且，由于光线的变红和强度的降低，接收到的图像很快变得太弱而无法被接收。对于位置遥远的观众来说，在黑洞内部发生的这一部分旅程都是缺失的。在穿越视界面时传输

的图像只能在无限的时间之后才能被接收到，而之后的图像将永远无法穿越黑洞视界。

在怪物的肠道中

在黑洞的中心有一个时空曲率趋于无穷的区域，因为整个质量汇聚于此。关于这个“奇点”的描述是一个真正的、依然悬而未决的理论难题，因为这个描述必须考虑到不包括在广义相对论中的量子效应。尽管如此，由于这个奇点不会影响到黑洞视界以外的时空，因此即便我们无法正确地描述它，我们从视界的这一边看到的黑洞的景象却是毋庸置疑的。从理论的角度看，在黑洞的中心只有一个黑暗的区域。

我们还是要探索一下奇点周围的区域。这个区域可以说是一种运动：它不仅处于运动之中，而且由于它的几何形状向中心倒塌，它还会促使所有位于这一区域中的物体运动起来。结果就是：在黑洞的内部物体无法静止不动，并且出现的运动轨迹必然集中在星体的中心，也就是说，我们可以将一个黑洞的内部描述为一个“翻转的”世界或时空。在通常的时空中，我们可以向任何空间方向移动。而时间的移动则只能是由过去向未来：这是一个定向坐标。而在黑洞中，角色发生了反转：黑洞中心的距离成了定向坐标。在测量中，空间代替时间成为一种“必然”，所有的物质都不可避免地发现自己与中心之间的距离缩短。这一情况让我们回忆起克里斯托弗·普里斯特（1943—　）的科幻小说《倒立的世界》的开头：“我的年纪已经达到了一千千米。”但是请注意，改变黑洞内的时间坐标的状态不能让我们就此回到过去和改变因果关系！其实，时间坐标不再代表一个物理上的时间。在这个环境中唯一能够保持一个方向的时间就是固有时间，这个时间是由一个和你一起向黑洞中心自由下落的时钟测算出来的。在黑洞里，固有时间只取决于距离坐标，当距离变短时，固有时间增长。因此，就像在黑洞外一样，一个自由下落的旅行者的固有时间继续向未来流逝。一个明显的区别仍然是，这个未来有一个计划好的结尾：奇点位于黑洞的中心，奇点之上不再有未来。有限的固有时间的间隔出现在穿越视界面的时刻和旅行者聚集在中心奇点的时刻之间。这个间隔的时间越长，黑洞就越大。对于一个质量为10个太阳质量的黑洞来说，这个时间间隔只有千分之一秒，但是对于一个超大质量的黑洞来说，比如那些位于星系中心的黑洞，这个探测的时间可以持续一个小时。

一个不是那么黑的洞……

在20世纪70年代，英国物理学家史蒂芬·霍金（1942—2018）就黑洞问题确定了一个基本的却出乎意料的结果。通过应用量子物理的规律，他指出黑洞可以放射光线，甚至是放射物质！这个结果似乎与黑洞的定义本身互相矛盾。为了理解这种奇怪辐射的原因，首先要记住在当代量子物理学中，波和粒子的概念都消失了。它们被“场”所代替了，这些物理概念能够描述所有可能的物质状态，无论涉及的粒子数量和能量如何。在这一理论框架中，真空的定义不再是当一切都被剔除时所剩下的东西，而是能量非常小却不为零的场的状态。并且，在微观世界里并不存在绝对的静止，一个系统的能量在微观世界中持续波动。

在真空状态下，这些波动表现为所谓的“虚拟”微粒的短暂出现，这些微粒会从真空中浮现，前提是它们可以迅速回到真空当中。在无限小的情况下，可以说是有可能借用一定数量的任意能量，也就是可能违反质能守恒定律，前提是能够很快偿还这些能量，尽管我们无法直接观察到，这些转瞬即逝的虚拟微粒可以与真实的粒子进行相反的作用，比如改变它们表面的电荷。

如果说能量的守恒被暂时打破，电荷的守恒却始终保持着：虚拟微粒总是以粒子-反粒子的形式成对出现。当成对的虚拟微粒在黑洞视界附近变成有形物质时，这就与我们的主题有关了。成对的虚拟微粒中的一个可能掉入黑洞当中，另一个则逃离到了无穷远。在一个遥远的观察者看来，这似乎是一个粒子从无到有的自动物化。当然，这些被发射的粒子（基本上是光子、电子和反电子、中微子和反中微子）并不都具有相同的能量。霍金指出，光子的能量分布与黑体发出的辐射光的分布具有相同的形状！因此，他能够给予黑洞一个和黑体温度类似的量值，并指出这个量值和黑洞的质量成反比。实际上，一个质量为几个太阳质量的黑洞的温度为十亿分之一开尔文，但是一个质量只有十亿吨的小黑洞发出的辐射热量约为1000亿开尔文。如我们之前所说，从黑洞外的角度看，仿佛质能是凭空产生的。事实上，辐射产生的质能都源自一部分黑洞质量的转换。因此随着辐射的产生，黑洞的质量和尺寸会缩小，天体物理学家称之为“黑洞蒸发”。这是一个发散的过程，因为当质量减小时温度升高，辐射的能量也不断升高，于是会加速黑洞质量的减小。最终，当辐射能量达到很高时，我们就说黑洞“蒸发”了。

一些物理学家已经有了将微型黑洞辐射应用为能源的设想。只需把微型黑洞安置好，如放在轨道上，并通过定期增补物质来弥补质量的损失以阻止辐散。结果表明，一个史瓦西黑洞的能量生产率最高可以达到5.7%，而一个快速旋转的黑洞的能量生产率可以上升到42%，这两种情况都比热核聚变获得的0.7%的生产率高得多。在科幻小说家查尔斯·谢菲尔德（1935—2002）的作品《麦克安德鲁的编年史》中，作者恰好描写了一位通过从黑洞中汲取神奇能量、创造出第一艘星际推进飞船的物

理学家。

宇宙旋涡

和行星以及恒星一样，黑洞也可以旋转。然而情况有所不同，因为一个旋转的黑洞不会像陀螺一样在一个静止的外部空间中转动。黑洞以一种旋涡式的不可抵抗的运动驱动着它周围的时空。一艘运动中的飞船会在它附近的区域里发现什么呢？

为了理解这一点，让我们继续与清空浴缸的水时看到的旋涡来做类比。在这种情况中，水在做一个螺旋运动，这个螺旋运动可以分解为一个围绕出水口的圆周运动和一个朝向出水口下方的径向运动。现在让我们想象有一艘船行驶在湖面上，而湖底有一个类似清空浴缸时的那种旋涡，这艘船行驶到了旋涡附近。船的发动机可以让船的最高时速达到20千米。在远离旋涡的地方，水面依然比较平静，显然船长可以任意航行，因为有发动机的动力，尽管有水的驱动力导致船发生缓慢的偏移，他依然可以校正航向。因此船长不用抛锚就可以控制自己的船和湖岸的距离，他可以让船靠近或者远离旋涡，甚至可以逆水流方向航行。当靠近旋涡的中心时，船只最终会进入一个区域，在这个区域里水流旋转流动的速度和船的最高时速相等。在这个临界距离以下，即使船的行驶方向是旋涡的相反方向，即使发动机全速运行，船也无法保持固定的位置。它无法抗拒地被推向旋涡的旋转方向。操纵船只的可能性降低，船只可能的行驶方向也不再是任意的：船只只能向前移动，旋涡旋转得越快，船只在区域中就越受限制。舵手可以熟练地摆脱这一尴尬情况，他要把油门全开，根据一个外向的螺旋轨迹正确地定位航向，并将船只引向远离旋涡中心的方向。如果船只冒险地去靠近旋涡中心，那么在一个时刻，水流的径向速度会达到每小时20千米，这就是船只的极限速度。这是真正的麻烦开始的时候：掌控船只航向的可能性变得非常低，于是船只别无选择，只能被拉拽到旋涡中心……

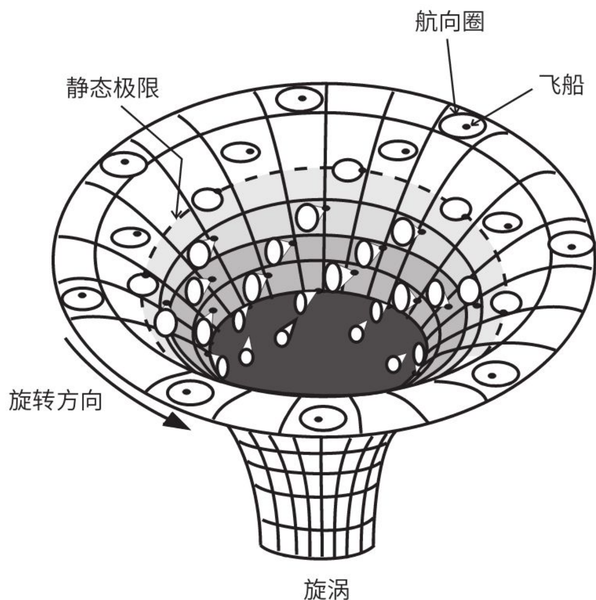


图7.飞船在旋转的黑洞周围的运动：无论航向和飞船速度如何，一秒之后，它必然会进入航向圈中。(© Jean-Pierre Luminet)

在旋转的黑洞周围，情况是类似的。一艘接近黑洞旋涡的飞船也要承受黑洞旋转导致的时空驱动力。这个运动在一个被称作“静态极限”的曲面里成为一种必然。在这个区域内，即使宇宙飞船的速度可以达到光速，它也无法与遥远的恒星保持相对静止！当我们继续接近黑洞时，我们会再看到之前所说的黑洞视界，它是黑洞的真正边界，是一个任何物质都无法逃脱的界限。一个旋转黑洞的视界完全被包含在静态边界内。对于一个旋转的黑洞来说，在静态极限处，时间仿佛“冻结”，发射的辐射被接收时伴随着无限的红移。但是物质和辐射最终会被限制在黑洞的表面。位于静态极限和视界之间的时空区域被称为能层[16]，因为它的属性可以让我们从中提取出能量。

英国物理学家罗杰·彭罗斯（1931— ）想象了下面这个巧妙的机制：在一个远离黑洞静态极限的位置上，我们朝能层方向抛射一个物体。这个抛射物的设计使得它可以在操作者设定的时间分成两部分。如果我们认真挑选初始轨迹，那么其中一部分最终将被黑洞捕获，而另一部分则会穿过能层并被收回。彭罗斯证明，抛射物这样被发出，可以使得被收回的那部分的能量大于初始抛射物的能量。这就使得被黑洞捕获的那部分在落入黑洞时，运动的轨迹是与一个黑洞旋转方向相反的螺旋轨迹。逃脱黑洞的那部分所收回的能量来自哪里呢？来自黑洞！对于黑洞来说，这个操作最终导致的结果就是质量增加，以及旋转能量下降。因此，旋转的黑洞起到的是一个巨大的能量储备的作用，如果我们足够熟练就可以从中获取能量……

我们可以理解，黑洞的惊人属性自然成了科幻作家最常用的主题之一。这些可以扰乱周围时空的迷人星体，常常被用作通往其他宇宙的“大

门”，仿佛我们身处的宇宙还不够大！因此在电视剧《巴比伦5号》中，太空旅行是通过人造黑洞完成的。作家丹·西蒙斯（1948— ）在他的小说《伊利昂》和《奥林帕斯》中赋予了莫拉维克人通过黑洞之间的桥梁在太阳系中移动的能力。类似的构思还出现在弗雷德里克·波尔（1919—2013）的《大门》和卡尔·萨根（1934—1996）的《接触》中，后者在1997年被改编成电影。黑洞经历了很多：这个概念从空想的思辨变成了天文学的现实状态，它的独特属性又使它成为科幻小说的中心主题。





B　黑洞引力

在那里，我们可以长久地沐浴黑暗……

——夏尔·波德莱尔[17]，《世界以外的任何所在》

正如罗兰所解释的那样，“黑洞”是一颗巨大的、密度极高的恒星，因此光线无法从中逃脱。夜晚的天空净化了大地的黑色，黑体的黑色超越了色彩的光谱，而黑洞则又超越了另一个黑暗的关卡，黑色具有一个巨大的引力。所有的光不仅不能驱散这种黑暗，甚至无法从中逃脱。形容词“黑”经历了这样的强化，它也不再只满足于站在光亮的对立面，它对光产生了威胁。它表示的不再是面对光线时的躲避，而是一个会吞噬光线的黑洞……如巴斯卡·基亚所写：“一个黑洞的引力胃口之大可以与光速匹敌。”（《评判的批评》，2015年，92页）在广义相对论的框架下，这意味着黑洞的质量可以将时空扭曲成一口无底的深井：一切都可能掉入这个深井中，再也无法浮现。这是极度的内爆。因为这颗星体已经发生了崩溃，它被称作“洞”。因为它会吸收物质和光，它被称为“黑”。然而，这两个词的隐喻性功能并不太完全。

将宇宙中物质的最密集集合称为“洞”，是不是有些自相矛盾？通常洞是空的，而不是装满东西的。罗兰说过，黑并不是绝对的：所有的黑洞的边缘处都是有点发灰的……然而，我们的遐想必须从探索“黑”这个形容词的含义开始，探索的方式是从关于黑洞的理想判断中而非现实的边缘处获得灵感。从理论上讲，黑洞的黑暗是如此强烈，以至于它会吸收光线，让光线无法离开。这个黑暗被转化为想象，它拥有一个与黑体膨胀截然相反的动力。黑洞以它不可逾越的引力将所有的时空集中在一个奇点上，并禁止了一切与外部的交流。它成了一个湮灭的象征。

宇宙坍缩

人类的意识水平已经不足以让我们理解这种不可抗拒的黑暗吸引力的想象意义，必须上升到真正的宇宙意识水平：黑洞的产生源自最庞大的恒星的死亡。作为时空的奇点，黑洞代表了一个宇宙级创伤。在它的黑暗中，有某一种东西在影响宇宙的结构和节奏，并且损伤了新柏拉图主义者口中的“世界的灵魂”。这个创伤带来了永恒的哀悼：黑洞象征的是对光的不可逆的捕捉，尽管人们认为光是不可捉摸的，实质上光是自由的，并且是永存的。在宇宙的生命中，发生了一些不可逆转的事件和难以逾越的灾难。

我们常把黑洞想象成可以吸入周围物体的虹吸洞道。仿佛整个宇宙必须吸收一切。然而在黑洞视界以外，任何与外界的交流都无法实现，黑洞对空间的扭曲和对其他物体的扭曲无异。黑洞的不可抗拒的命运只会威胁光和物质的存在，而这些存在会冒险地穿过一道命运的视界面：潮汐效应的强度会将光和物质无限拉伸，然后将它们合并到黑洞的质量以及巨大的密度当中。黑洞不会试图遗漏我们，它孤独地延伸着，与世隔绝。远离“静态表面”之上的物质继续着它们平凡的生活，而靠近“静态表面”的物质，即便它们抵抗着这个吸引力，也会有一种自此陷入崩溃轨道的感觉。它们也知道自己除了任由自己被带走之外无计可施。

因此，黑洞是宇宙坍缩最强有力的证明：没有任何东西可以缓解这种灾难，因为一切太靠近它的物质最终都会被吸入。空间和时间的结构似乎在躲避那些任由自己被吸入的物质。它们没有力气移动或升起。当宇宙的主体部分在静止的坍塌中崩溃时，宇宙变暗了。这黑色的吸引力是巨大的、无法比拟的。这里要考虑到某个可怕的事情，在我们身处的银河系中心，有一个同样非常黑暗的、贪婪的和沉重的存在。隐藏在黑体中心的黑暗抵挡了光线，可这黑暗并不阴沉，甚至还包含着一些温暖。而在黑洞中，黑暗带着一种负面的含义，获得了一种令人担忧的积聚动力。关于空气的想象，巴什拉强调解脱和上升的遐想与堕入罪恶的黑暗深处之间的对立。黑暗将我们吸入旋涡，在深渊的底部等待着我们。一切行将结束的梦中的坠落都完结在黑暗的中心：“好像深渊的黑暗可以擦除一切，仿佛最后坠落的只有一种颜色：黑色。”（《土地与意志的遐想》，400页）在黑洞的召唤下，我们的脑中充满了学术上的遐想，我们的遐想围绕着这无法抵挡的“深渊的黑暗”的语义世界，屈服于这种颜色魅力的人肯定会有一个不幸的命运。巴什拉用一些造成凄凉回响的词语完成了他对隐秘夜空的再现：“它是坠落旋涡的时空。更远处，在一个完成的坠落中，诗人将会看到黑色。于是‘黑与空’紧密地结合在一起。坠落完成，死亡开始。”（《土地与意志的遐想》，402页）“死亡开始”，这是多么非比寻常的用语啊！它与天体物理学家那个同样令人回味的用语完美契合：“跨越事件视界”。它没有回来，只剩下黑色星体无法逃避的吸引力。这是对浪漫主义诗人所颂扬的不可避免的毁灭的一种迷恋。

忧郁的星体

为了准确说明一个如此可怕的黑色的色彩差异，我们想起了那个经常出现在浪漫主义诗歌和版画中的“黑色的太阳”。没有人能比维克多·雨果更好地描写它了：

在那里，一切都浮现并消失在昏暗的沉船中；

在这个旋涡里，没有边界，没有气窗，没有墙壁，

灰烬不断地从这些曾经存活过的东西上倾泻下来；

当我们的眼睛敢于向下看时，我们看到了底部，

超越了生命、气息和噪声，

夜晚从可怕的黑色太阳中蔓延出来！

（维克多·雨果，“影子的嘴说的话”，《沉思集》第六卷，26页）

每一句诗句都仿佛预示了这场罗兰邀请我们参与的危险旅程：一旦我们离黑暗的星体太近，就会被捕获；一旦我们被捕获，就不可能抓住任何东西；一切都被拉入黑暗的中心，毁灭我们所有希望的黑色的太阳就在那里。

这颗令人忧郁的星体已经出现在了德国画家阿尔布雷希特·丢勒（1471—1528）的绝妙版画《忧郁I》（1514）中。画面展现了一个拥有天使翅膀的美丽女人，周围围绕着权力、财富和知识的象征物。然而她对这些并不在意，而陷在某一种病态的思想中，她的表情中沉思多于忧伤。在她的身边，一只狗打着盹，一个小天使像是很无聊。在夜晚的天空中，一个小恶魔展开忧郁的旗帜，在一颗似乎吸收了所有光线而并没有发光的星体之下扬扬自得地飞翔。积聚的力量占了上风：如精神集中在阴暗的反思上一样，光芒凝结在一颗黑色的星体上。

法国诗人热拉尔·德·内瓦尔（1808—1855）先于天体物理学将一颗恒星的死亡归因于这颗黑暗星体的诞生，这颗黑暗星体使他的诗歌充满悲伤：“我唯一的恒星死了， 还有我布满星星的鲁特琴，带来那忧郁的黑色太阳。”（《被剥夺者》，1854年）他忧伤的梦最终将他推向了自杀。今天，查尔斯·伯恩斯（1955—　）创作了美丽却让人不安的漫画《黑洞》，它重现了这个浪漫命运的神话：一种奇怪的疾病导致处于青春期的青少年发生可怕的突变。黑洞象征着一代人生活的痛苦，危险性欲的烦扰以及厌世的年轻人对死亡的迷恋。黑洞可能是卡尔·古斯塔夫·荣格[18]眼中对人的个性的最高考验：意识到失败是可能发生的，甚至是不可避免的。

忧郁的浪漫神话还取决于这样一种观念，即创造者的个性将灵感的天赋与一种不可抗拒的忧郁结合起来，当这种忧郁诞生于对人类状况清楚的注视时，它就会更加难以抗拒。这个思想并不新奇。自从希波克拉底医学描述了黑胆的特性——这一疾病的产生是由于黑胆汁过量，像是一种严肃而认真的幽默，哲学家和医生们便不再揣测天才和忧郁之间的神秘联系。长久以来被认为是亚里士多德所著的小专论《问题×××》中强调天才中有大量的癫痫病患者，这种高级的疾病被认为是由于黑胆汁分泌过多导致的。年代离我们更近一些的艾萨克·牛顿爵士，他提出的万有引力定律使我们可以设想一个“封闭星体”的存在，光线无法从这个星体中逃逸，这是关于相对论中黑洞的经典预言，而牛顿本人不就是癫痫病患者嘛！

当然，这只是迷信和无稽之谈。发现遮光效应的约翰·米契尔和皮埃尔·西蒙·拉普拉斯，提出广义相对论的爱因斯坦，推测出黑洞存在的卡尔·史瓦西（其姓氏的含义为“黑色的盾牌”），以及赋予这个宇宙奇点一个令人不安的名字“黑洞”的约翰·惠勒，他们并不是癫痫病患者。一个学术性的遐想不会沉溺于星体对天才性格的影响上。相反，我们也不会轻易从集体的想象中剔除模糊的直觉，因为一种过于强大的智慧会将这种直觉不可避免地引向一些可怕的发现。关于黑的传奇引人入胜，它拥有一种难以抵抗的诱惑力：既然蠢货是幸福的，那么智者和学者不是应该生而忧郁吗？他们的思想是如此深沉，以至于让他们心情抑郁。

因此，我们终于自发地产生怀疑，一切最辉煌的最受人尊敬的生命里都隐藏着一种深不可测的忧伤。然而，一个黑洞被间接检测出来，如同一种阴郁的疯狂躲藏在冷酷的智慧之外。为了证明黑洞的存在，我们必须观察其他星体的旋转，因为如果没有黑洞存在，其他星体就是围绕这样一个虚空旋转，就好像我们看到一些人没有缘由地小心翼翼地做着重复的手势。当遥远的辐射在通过一片明显空白的空间区域后，并传送一幅失真的图像时，当一个乍一看似乎严谨的推理将现实歪曲到无法辨认的地步时，我们可以猜测到一个巨大的凹陷的存在，它改变了我们对空间和时间的感知。如果说银白色的星系是围绕着同样的旋涡旋转，难道不可怕吗？当想到一些恒星在发出过量的光芒后，最后走向崩溃，那些原本由它们发散给宇宙的光线被囚禁了起来，难道不让人感到失望吗？这种失望会让我们忘记在我们之外还有一个世界存在。

如果说黑洞是一个让伟大的精神永远沉没并且无法重新显现的深渊，那么它是一个阴森的象征。然而，将黑洞理解为关于宇宙坍缩的比喻，还是某种意义上的缩小。因为我们要再提一次，一个巨大而美丽的图像，一个真实的、被赋予真正心理活力的图像，总是具有双重性的。

因此，法国古文字学家米歇尔·帕斯图罗（1947—　）在他关于黑色的历史中（《黑色的历史》，2008年）提到，起初，在印欧语系的语言中，有两个不同的形容词来指示黑色。拉丁语中有两个词：一个是“ater”，指的是没有光泽的黑色，这个颜色肮脏而丑陋，后来在法语中变成形容词“atroce”（恶劣的）以及后缀“-âtre”（用来构成一些贬义的、令人忧郁的颜色，比如“bleuâtre”——近蓝色的，“verdâtre”——近绿色的，等等）；另一个是“niger”，指的是美丽的发光的黑色，所有关于黑人特点的词语都由此而来（这表明这种肤色在变成种族主义的偏见之前，是一种令人艳羡的美丽色彩）。孕育出盎格鲁-撒克逊语言的语系中也包含两个形容词：一个是“swarz”，用来描写没有光泽的、坏的黑色，后来演变成德语中的“schwarz”；另一个是“blaek”，用来描写发光的、好的黑色，后来演变为英语里的“black”。这样的区别是由光泽度来区分的，这让我们回想起，在先人的眼中，如果要从视觉上区分物体，发光度是一个比着色度更密切相关的标准。这也说明，黑色的符号体系始终是两极化的，具有双重性。

就关于黑洞的想象而言，这意味着它并不是要体现对光的哀悼这个唯一的负面价值。黑洞仿佛是一个死亡的星体，因为我们设想它暗淡而无生气；而当我们把它想象成一个明亮而活跃的星体，它就变得令人兴奋，甚至有时很积极。我们假想一个正在自转的黑洞图像，随着它的吸积作用，它的光盘会变亮，而它周围的恒星由于惯性抵挡着它巨大的吸引力，甚至整个星系都在它周围旋转。是黑洞确保了银河系的内聚力，是一个黑暗的中心保持了恒星的聚集。我们同样会想到黑洞的“头发”和“蒸发”，史蒂芬·霍金将这种辐射现象与黑体辐射做类比，以缓和处于暗淡中的黑暗并找寻到能量（通过成对的虚拟粒子-反粒子形式的真空波动）。但是，除了这些严肃的天体物理学概念之外，让我们冒险进入丰富的科幻小说之中（罗兰就是一个狂热的科幻小说爱好者），去发现这些星体的黑暗所带来的非常积极的价值。

有一种科幻类型被称作“硬科学”，查尔斯·谢菲尔德是一个“硬科学”科幻的伟大作家，他在作品《麦克安德鲁的编年史》中假想，如果人类从迷你黑洞的旋转中获得一种几乎取之不尽的能源，会发生什么事情。他认为这是将自己推向太空的合适的能源。闪亮的旋转的黑洞成为人类将自己从本星球、太阳系以及银河系中解放出来的方式。

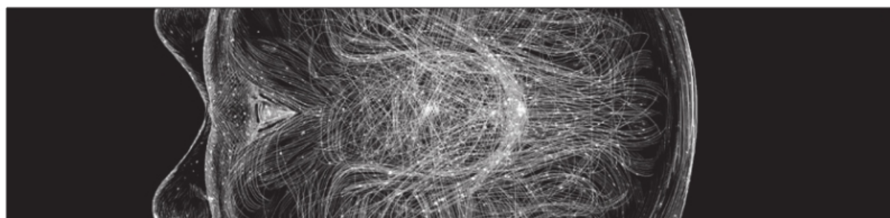
再想象一下，黑洞可以成为我们逃离世界，像夏尔·波德莱尔梦想的一样去到“世界以外的任何地方”的方法。发光的黑洞形象颠覆了关于囚禁光线的想象：黑洞的吸引力，撕裂了时间和空间的跨度，成为想象中能够逃跑的机会。在1979年上映的电影《黑洞》里，一艘宇宙飞船被吸入黑洞中。这艘飞船没有像预料的那样脱离并消减到等离子体状态，而是通过空间和时间被投射出来，黑洞成了一扇闪光的宇宙大门。这种思

想在电影《接触》（1997）和更近一些的《星际穿越》（2014）中都有呈现。我们可以从中看出电影编剧对于科学信息的匮乏，甚至有关于“洞”这个词的文字游戏，将“洞”当作了秘密通道，但实际上是灵感来自“硬科学”的科幻，或者它至少足够靠近一些物理学理论家的思辨。

1935年，爱因斯坦和纳森·罗森（1909—1995）发现，通过广义相对论方程得出的一些解法可以让时空的一个区域与另一个区域相连。我们将这些宇宙奇点命名为“爱因斯坦-罗森桥”。20世纪60年代，惠勒通过把这些奇点与蚯蚓在地上挖的洞做类比，将其命名为“虫洞”。它们是时间和空间之间的捷径，一边连接着吸收物质和光线的黑洞，一边连接着“白洞”，也就是物质和光线发射出来的地方。惠勒也确定了它们的不稳定性。1988年，美国物理学家基普·索恩（1940—　）和迈克尔·莫里斯指出，从理论上讲，如果被吸收的一部分物质质量为负，则可以稳定虫洞。那么虫洞是可以被穿越的吗？在我们的认知中，宇宙中并不存在负质量的物质（我们也从来没有发现过白洞）。然而，对于人的想象力（包括天体物理学家的想象力）来说，通过对称图像来平衡一个具有强烈感的图像总能给心灵带来乐趣：白洞之于黑洞，就如同密道之于监牢一样。

这就是为什么说黑洞不仅仅是一个有吸引力且我们无法逃脱的重要星体。当它鼓励想象力超越界限，逃离原本的世界时，它也包含着丰富的形式。坍缩只是太过迟缓的图像造成的倾斜线。一个有创造力的想象力，甚至是像伟大的理论物理学家或最好的“硬科幻”作者的天才想象力，反而会从中发现一种刺激物，将自己从空间和时间中解放出来。

Part 4



A　暗物质

当秘密非常巧妙的时候，它们就隐藏在光明中。

——让·季奥诺[19]，《恩尼蒙德和其他人》（*Ennemonde et autres caractères*）

事实上，我们发现一颗星体不是通过直接观察它的光，而是通过计算。1844年，德国天文学家弗里德里希·贝塞尔（1784—1846）指出，天狼星自身运动的异常是因为有一颗我们看不到的伴侣星体的存在；18年后，天文望远镜有了很大的改进，我们发现天狼星旁有一颗白矮星。1846年，天文学家奥本·勒维耶（1811—1877）和约翰·亚当斯（1819—1892）指出天王星的运动异常——似乎违背了牛顿的万有引力定律——是因为一颗不知名的行星导致的；天文学家约翰·伽勒（1812—1910）根据勒维耶的计算结果，在只比计算出的位置低1°的地方发现了一颗行星——后来被命名为海王星。1932年，荷兰天文学家扬·奥尔特（1900—1992）试图通过研究太阳附近恒星的速度分布来确定太阳附近的银河引力场，他得出的结论是，要解释恒星的运动，普通物质仅仅占了所需物质数量的一半。同时，美籍瑞士天文学家弗里茨·兹威基（1898—1974）研究了星系在北天星座后发座（象征物为埃及王后伯伦尼斯二世的头发）星系团中速度的分布。他于1933年指出，用来解释测得的速度所需的质量是星系团质量的十倍。“缺失质量”的难解之谜就此产生，这个难题在近50年的时间内一直没有解开。由于大量的数据表明，宇宙质量的绝大部分是很小或者不明亮的，因此无法被直接观察到，这一问题又重新回到科学家的研究当中。此外，这种暗物质似乎出现在很多不同大小的范围内：它分布在整个星系的范围内，也同样在星系团的范围内，乃至在整个可观测宇宙的范围内。

暗物质的发现

一个跟我们身处的银河系类似的螺旋形星系包含了近2000亿颗恒星，它们聚集在一个直径约为10万光年、厚度约为1000光年、中部凸起的圆盘上（光年是指光以每秒30万千米的速度运动一年经过的距离，约为9.46兆千米）。恒星之间有高温密集的气体，这些气体构成了促使新恒星产生的星际介质。这个由恒星和气体构成的圆盘的动力来源于星系旋转产生的离心力与这个物质圆盘自身引力之间的制衡。大多数恒星的轨道可以被大致分解为在圆盘平面上的旋转运动和垂直于该平面的振荡运动。这个振荡对物质的局部密度非常敏感，物质的引力吸引的作用是一种回动力，与弹簧的回动力相似。扬·奥尔特的方法建立在关于垂直于圆盘平面的振荡分析之上，他由此推导出了圆盘的引力场，从而推断出其质量分布，然后只需将这个质量分布与针对恒星的普查结果得出的质量分布进行比较。为了解释局部的运动，扬·奥尔特认为所需的物质密度必须是他所观察到的物质密度的两倍。如今，得益于依巴谷卫星的天体测量观测，关于银河系盘面的暗物质问题似乎已经得到了解决。依巴谷卫星提供了一个由约12万颗恒星组成的更为公平的、准确的、完整的实验采样，这是扬·奥尔特所没有的。最后，圆盘的动态密度与观测到的恒星密度相符，似乎圆盘中并不需要有暗物质的存在。2013年12月发射的盖亚天体测量卫星正在进行同样的研究，但它的研究样本中包含的恒星数量是依巴谷卫星的8000倍。另外，对恒星动力学的理解始终建立在整个星系的范围上，这个范围比其唯一的恒星圆盘要宽广得多。

星系中的暗物质

美国天文学家薇拉·鲁宾（1928—2016）是第一个通过光谱学来研究螺旋星系旋转的科学家。通过观测圆盘上恒星光线的多普勒频移，可以根据距离星系中心的长度测算出圆盘的转速。这个方法只能达到星系光线的边缘，而这个边缘距离星系中心还有好几万光年。但是通过无线电波对中性氢原子组成的星际云进行观察，可以将距离推进两倍。根据距离星系中心的长度测算出旋转速度，我们就有可能推算出整个圆盘的引力场及其质量分布。然后，我们可以将这个结果与对恒星亮度的限定值进行比较，随着与星系中心的距离变远，这个亮度依照指数曲线减小，大部分质量应该位于靠近中心的区域。如果这个假设是正确的，那么旋转速度在远离星系中心时会先增长，然后在距离更远时，速度迅速下降。但是观察到的结果却非常不同：圆盘的旋转速度在远离中心时首先会增长，之后速度并没有降低，而是基本保持恒定。这表明，大量的物质是位于低光或不相关的区域内，以及圆盘之外。对数以千计星系的系统研究表明，这种异常是普遍的：要解释几乎所有螺旋星系的动力，都需要过量的“暗”物质，即事实上隐形的物质。解释这种异常的一个方法是，设想有一个形如球面的巨大光环，其宽度为恒星圆盘的十到二十倍。然而，为了探测到更远处的引力势能，我们必须对更远处的物体进行观测，如球状星团或卫星星系，以及银河系中的两个麦哲伦星云。银河系光环的宽度大约延伸到了几十万光年，这个光环占据了我们与距离银河系最近的仙女座星系之间空间的很大一部分，并且仙女座星系本身也有自己的光环。如果是这样的话，在一个聚集了几百甚至几千个星系、半径为几千万光年的星团里，会发生什么呢？

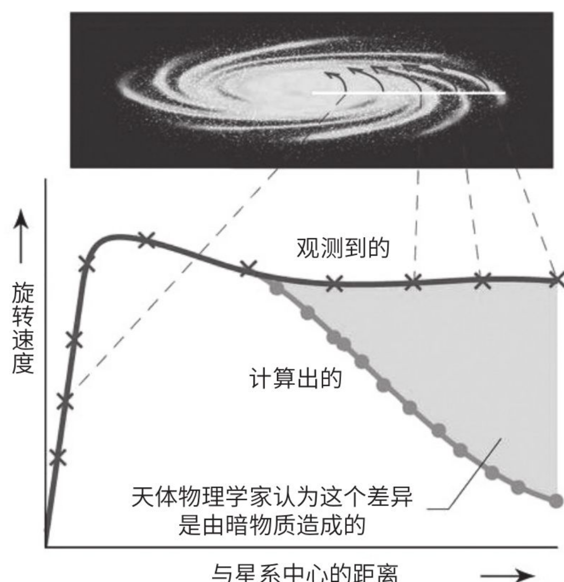


图8.通过直接测量得到的星系旋转曲线与通过从发光物质（恒星和气体）分

布推导出的旋转曲线是不同的。这一发现是暗物质假说的起源。

星系团中的暗物质

弗里茨·兹威基在观测到后发座星团中的动力异常后，首先提出了关于星系团中有暗物质存在的猜想。如果我们把一个数量大于发光物质的隐形暗物质考虑进去，这个异常就会消失。兹威基最初的结论是基于维里定理——一个经典力学的结论。维里定理指出，在一个处于动力平衡的自引力体系中，势能的绝对值是动能的两倍。根据两个测出的量，即由光谱测定出构成星团的星系的平均速度和星团的大小，我们可以应用维里定理估计出星团的质量。现在已经证实，即便考虑到由旋转曲线研究推导出的暗物质，用于结合大星团所需的质量也远大于各星系的质量总和。

然而，维里定理的方法并不是完全确定的。首先，我们必须确保对星团中的星系进行正确的计数，避免将星系团以外的星系计算进来，也不能遗漏光度很低的星系。其次，星团并不总是处于动力平衡状态——而这是维里定理的应用条件，这个平衡时间有可能超过宇宙的年龄。最后，我们看到的星团与事实是有出入的，因为所有的距离和速度都是根据其在我们视线上的投影测量出来的。但是，通过X射线对星团的观察证实了这些得到的结果，这要归功于一些专用卫星的利用，如ROSAT卫星（ROSAT是德国伦琴卫星的首字母缩写）、XMM-牛顿卫星（XMM是X射线多镜面的缩写）以及Chandra卫星（这个名字是为了纪念诺贝尔物理学奖获得者苏布拉马尼安·钱德拉塞卡，1910—1995）。在这个发光的范围内，星团的强烈放射来自一个温度高达100万摄氏度以上的超热气体，在这个气体中聚集了星团中的星系。对星系间气体X射线发射的分析使我们可以同时确定星团和气体的总质量。所有这些信息表明，恒星只占星团动力所需总质量的2%～4%，热气则仅占12%～16%。这意味着，如果要解释星团动力，这里还缺少80%～86%的质量。近期的一个方法证实了这些结果，这个方法旨在分析位于星团外的星系发出的光的引力畸变。

宇宙幻象

自1986年以来，众多的星系团图像展现了变形的星系。最壮观的图像展示出一些巨大的发光弧，这些结构被认为是位于星团后面的星系的变形图像。爱因斯坦的广义相对论预测这是一个“引力透镜”效应。如我们之前所见，广义相对论将时空描述为一个由于物质存在导致变形的弹性网络。光是沿着弯曲时空的较短路线（短程线）运动的，因此光的运动轨迹会由于物质的出现产生偏差。与玻璃透镜导致的光线偏移类似，质量起到了“引力透镜”的作用。

我们根据引力透镜对观察到的发光弧做出了解释，对变形图像的光谱分析可以证实这一解释。实际上，由于宇宙膨胀，一个遥远物体发出的光会发生红移。形变源的红移总是高于干扰星团的红移，并将形变源置于星团之后。比发光弧更常见的是小弧，小弧是星系背景的小图像，由于星团场的影响发生轻微的扭曲。这些畸变的分布、方向和强度使我们非常准确地、可能略带些模糊地重新构成导致畸变出现的星团质量分布。所有这些研究的结果都是质量的增大，它以一种完全独立的方式证实了速度分布研究和X射线发射的研究结果。

宇宙中的暗物质

引力透镜的研究方法可以应用到整个天空。遥远星系和地球之间存在的物质会导致遥远星系的光线发生偏离，我们所接收到的图像会发生轻微变形，这些图像可以让我们重新构成宇宙范围内的质量分布。1996年，法国天文物理学家雅尼克·梅里耶（1958—　）和他的团队着手测定整个宇宙中的暗物质数量，并画出暗物质在星系团之间的分布图。2012年年初，爱丁堡大学的苏格兰天文学家凯瑟琳·海曼斯和不列颠哥伦比亚大学的法国天文学家卢德维奇·范瓦尔贝克领导的团队推进了这一进程。他们选取了前所未有的宇宙范围，并成功地绘制出其中的暗物质。为了勾勒出暗物质的轮廓，他们研究了位于天空四个不同区域的1000万个遥远星系发出的光的畸变。欧洲航天局正在进行的欧几里得天文任务，旨在测定宇宙中暗物质的分布情况，以及自宇宙大爆炸以来这一分布的演变方式。

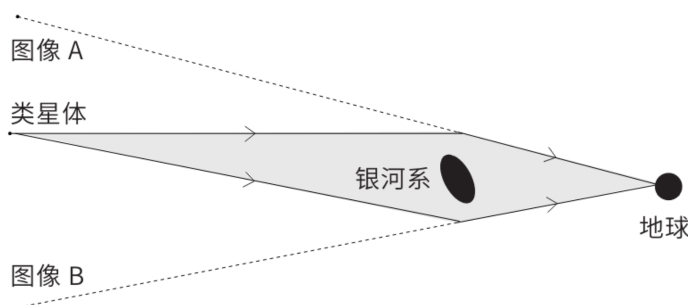


图9.引力透镜效应。一个星系的质量会使遥远的类星体的光线发生偏转。位于地球上的观察者看到的光线图像是多重且扭曲的。

整个宇宙中充满了宇宙微波背景辐射，关于这一辐射的研究使得我们可以确定宇宙的总成分。我们还记得，在2725开尔文的均匀温度下，这道古老的辐射是以黑体辐射的形式被观察到的。但温度微小的不均匀性就会体现出原始物质（未来星系的起源）中密度的不均匀性。在宇宙学标准模型的框架下，对这些不均匀性的统计研究使我们可以估算出宇宙中物质和能量的密度。结果令人惊讶：宇宙中物质的密度比普通物质的密度高出5倍（26.8% vs 4.9%），而且，总密度受制于迄今未被探测出的能量元素（68.3% vs 31.7%，参见关于暗能量的下一章）。

原始核聚变

另一种观点认为，有一种未知的物质存在。如果我们回到过去，回到宇宙微波背景发射之前，宇宙经历了一个温度高达100亿摄氏度的阶段。由于温度过高，核的强烈相互作用无法确保核心的稳定。因此宇宙流体由核子（质子和中子）的混合物组成，其中有大量的电子、光子和中微子。中微子的作用非常重要：核子不断吸收和放射中微子，它们将质子转换为中子，将中子转换为质子，以达到二者之间的平衡。

由于宇宙的膨胀，温度下降，中微子不再与核子产生相互作用，从而打破了之前的平衡。中子是一个不稳定的粒子，在不到十五分钟的时间内，它就会分裂成一个质子、一个电子和一个中微子。保存中子的唯一方法是将其与质子结合以形成氘原子核。这是核聚变产生氦-4原子核、氦-3原子核和锂-7原子核的第一步。三分钟后，宇宙膨胀导致的冷却终结了这个最初的核作用。原子核中中子的比例是多少呢？这个答案取决于宇宙中包含的物质数量。如果其中核子的数量非常少，质子和中子之间的相撞就很少，产生的氘也会很少，大部分中子会被分解。如果是这样的话，与氢相比，氦-4产生的比例很小。相反，如果宇宙中有大量的核子、质子与中子频繁相撞，核反应有多剧烈，氦-4产生的比例就有多大。而且，物质的总量会影响到膨胀的速度，从而影响到原始核聚变持续的时间：短暂的核聚变持续时间将会对应少量的合成元素。因此，测定出目前氦-4比例的原始基值，我们可以估计出宇宙中由质子和中子（也叫重子物质）形成的物质的数量。我们所发现的值为4.9%，这就证实了，可观测的宇宙中大部分物质不是以发光的形式出现的，气体和恒星只占普通物质的0.5%。

一个新的定律？

然而，暗物质之外的其他假设可以用来解释观测到的动力异常。我们现在要做的不是假设一个新的实体——如暗物质——的存在，保证物理定律不变（“本体论”的方法），而是可以通过修正这些定律来减少理论与发现之间的差距（“立法”的方法）。因此我们认为，修改理论框架是一个可取的方法，也就是说，可以引入一个引力以外的力量，或者对引力法则提出疑问。1983年以色列物理学家莫德采·米尔格若姆（1946—　）提出的“修正牛顿动力学”理论（也称MOND理论，Modified Newtonien Dynamics的缩写词），就是对万有引力定律提出了疑问。他假设在出现微弱的加速度的情况下，万有引力会遵从修正后的定律。这个提法很好地解释了星系内的旋转速度，但MOND理论仅在这个范围内成立。MOND理论被用于描述星系团，尤其是Boulet星团（船底座）的结构，也需要提出一种非重子的物质形式。很多精准的测试限定了新的万有引力定律的使用范围，这些测试也是广义相对论在太阳系中所用过的。另外，关于万有引力的实验是在大范围内进行的，科学家们巧妙地将相关数据与引力透镜、星系团以及星系速度结合起来。他们得出的结果几乎完全排除了一些替代理论。只有引出暗物质的模式是有成果的：这个模式给出了最简单的解释，但同时引出了一个神秘的物理学实体。

暗物质的属性可能是什么？

如果说只有通过暗物质的引力作用我们才能发现它，那么它是由什么构成的？答案很简单：或者是一种已知物质的不发光形式（“重子”物质），或者是物质的未知形式（“非重子”物质），这种未知形式最终会比我们已知的形式更为普遍。那么，它以何种形式存在呢？答案很多。

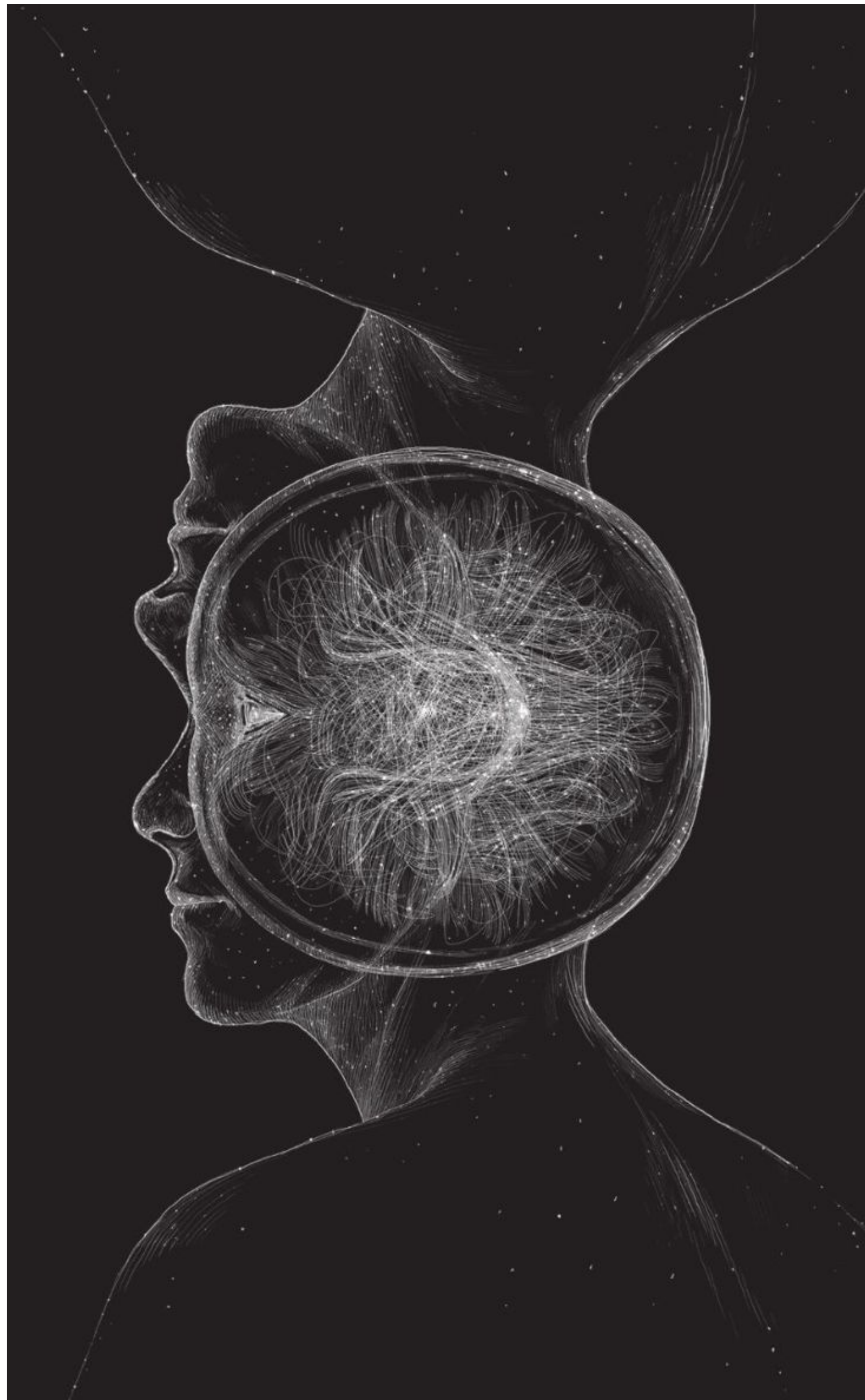
气体和尘埃通常可以通过它们的发射线或吸收线检测到，因此从这个意义上讲，它们并不是真正的暗的。它们在银河系星盘中存在的数量相对较大，在银河系中，气体质量大约只有10%到15%的恒星质量。但是气体和尘埃的质量仍然不足以解释星系的旋转曲线，光环不可能完全由辐射气体构成：它的平衡温度接近100万摄氏度，这个温度会导致X射线的辐射比我们所观察到的要强得多。一方面，我们对原子氢进行了深入研究，它的数量显然并不够充足；另一方面，分子氢的含量几乎不受限制，但分子氢是不能被直接检测到的。

中子星和黑洞也有可能是暗物质。在宇宙形成之初，第一批超大质量的恒星可能会在自己最终崩塌时创造出大量的中子星和黑洞。为了使90%的重子最终到达中子星或黑洞中，质量较小的恒星（太阳质量的1/2到1/4）的数量必须非常小。问题在于：银河系星盘上70%的恒星都是这样质量的恒星，它们的质量不到太阳的一半。而超大质量恒星在成为中子星或黑洞前，就发生了爆炸，成了超新星，它们的大部分质量在星际间飘散，于是星际间充满了爆炸中产生的重核，如铁。宇宙中重核的数量比我们已知的数量大得多。最后，黑洞接受的星际气体，由于在坠落期间其温度剧烈增高，也必须以能够被探测到的红外线形式进行放射。我们没有探测到任何这种形式的红外过量现象。

还有其他种类的不明亮物体，如褐矮星。这些恒星质量较小，不到太阳质量的8%，过低的质量使它们无法产生热核聚变反应，白矮星也由于体积过小而无法发出明亮的光。它们是类太阳恒星进化的产物。而中子星是超大质量恒星死亡后留下的星体，它们是完全不发光的。

中子星、黑洞、白矮星和褐矮星统称为晕族大质量致密天体，也就是MACHO（Massive Compact Halo Objects）。这些天体的数量足以解释星系中的巨大光环吗？ EROS计划（Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres，寻找暗天体实验）旨在回答这个问题，每天晚上都有一台望远镜在测定麦哲伦星云（银河系的两个小卫星星系）中数百万颗恒星的亮度。由于银河系光环中的一颗暗星体从已知恒星的运动轨迹上经过时，会导致光线在短时间内扩大，我们需要探测出这个短时间内的增长量。另外，还有一个引力透镜效应。我们经过十年的追踪研究确定，银河系的黑暗光环并不是主要由暗星体组成的，重子暗物质的属性问题始终是一个谜。

此后，天文物理学家大多承认非重子暗物质的存在。他们将希望寄托在中微子这个与物质相互作用非常微弱的粒子上。中微子的质量虽然不为零，但也不足以解释非重子暗物质。我们至多可以认为，中微子对宇宙物质平衡做出的贡献与恒星相当。除了中微子外，粒子物理学还无法确定地知道有哪种粒子可以与非重子暗物质相对应。然而，新的理论发展拓宽了粒子物理标准模式的领域，预测了新粒子的存在，而这些新粒子很有可能是暗物质的组成部分，它们的通用名称是WIMP（Weakly Interactive Massive Particles，大质量弱相互作用粒子），它们是一类大质量的、稳定的粒子，与物质的相互作用很弱。新粒子中最轻的是“超中性子”，它可能就属于WIMP粒子。物理学家们希望能够在大型加速器中检测到它们，如位于日内瓦的CERN大型强子对撞机。他们还试图通过安装在数百米岩石或南极冰层下的探测器来发现它们的存在，这可以对WIMP粒子起到保护作用，避免它们受到其他类型的粒子的影响，以便探测出暗物质粒子与机器中原子的罕见相互作用。这些实验是很困难的，因为它们要面对很多的干扰源。一些实验团队宣称观察到了暗物质的信号，但其他实验团队则宣布这些发现无效。目前，这个问题依然没有答案。未来几年，情况或许会变得明朗，因为实验人员在不断地提升探测仪器的灵敏度。如果在研究人员的努力下，这项研究依然没有成果，那么暗物质的理论肯定很难成立。无论如何，在探究暗物质的起源方面，天文物理学家已经用一种外来的物质填满了整个宇宙，关于这种外来物质的探索很可能是21世纪最伟大的科学冒险之一。





B　暗物质的炼金术

现代诗人重新发现了炼金术士关于黑色的古老遐想，炼金术士们在寻找一种比黑色更黑暗的黑（Nigrum nigrius nigro）。

——加斯东·巴什拉，《土地与对静息的遐想》

20世纪30年代，瑞士裔美国天文学家弗里茨·兹威基在后发座的一个星团中发现一些星系的相对速度异常地高。他得出结论，如果这些速度能由引力效应来解释的话，就意味着存在一个质量，它远远大于已经被观测到的物质质量。他的同事们没有被这个结论说服，而是产生了怀疑，甚至剥夺了他检验假设所需的观察时间。兹威基是一个脾气暴躁的人，他因为失去了观察时间而感到痛苦，于是他对同事们使用一些恶意的讽刺。渐渐地，他感到自己被完全孤立，有些人开始到处传播一些关于黑的传说，认为是他性格中“孤狼”的那一面使他被排斥。无论如何，由于大家不愿意听从他的假设，天文学和物理学的发展停滞了40年。而关于暗物质的起源问题，好像就存在着某种我们不愿意看到的东西。

如今，这个借口似乎已被推翻：形容词“暗”和“物质”配合使用，总是意味着发现这种神秘物质的困难甚至是不可能的，但是这种晦涩往往也会对科学研究起到激励作用。几乎所有的天文物理学家都相信暗物质的存在，即便他们并没有亲眼看到过。因此，黑色成了这个假设实体的一部分。因为这种物质是“暗的”，是未知的，所以这个外来的物质激发了科学家们的想象力。它的黑暗意味着通过常规手段无法探测到它的存在，但是这种束手无策不再被解释为暗物质可能不存在的指征。与此相反，它的黑暗反而让这些看似疯狂的理论思辨显得合理！暗物质是所有天文物理学家和粒子物理学家共同寻找的隐藏物质。

一种比黑色更黑暗的黑

为了研究暗物质的假想共振，我们将使用一种神秘艺术的形象以及一种隐藏真相表达的话语资源：秘术语料库。天体物理学与炼金术之间的这种亲密关系，并不意味着古老的炼金术士的研究与当代科学家的研究有丝毫联系。我们是基于想象中的事物提出的这个方法，因为关于秘术的文字勾勒出无数与物质、神秘和黑暗相关的形象，这些文字通常用来描写被炼金术士称作“暗物质”的东西，而它们的另一个名字则更加被人熟知：“苦炼”（或称深渊）。因此，我们将研究的是，暗物质的炼金术形象在接触到关于暗物质的天体物理学假说时，是如何被唤醒并转化的，以及作为回报，它是如何对暗物质进行“上色”的。

和天文物理学家们研究的暗物质一样，炼金术士的暗物质首先是与星体的光相对的：它就像是一个阳光永远无法照到的阴影。德国炼金术士米夏埃尔·迈尔（1569—1622）用一种非常神秘的方式，将这个神秘的阴影与天文艺术联系起来：“在天文学中，阴影的作用非常重要，如果没有阴影，关于这门科学的研究将很难完成。”（《逃跑的阿塔兰塔》，1618年，189页）他的论说从物体投射的影子讲起：“太阳不能穿透密实的物体，因此所有的影子都与事物是相对应的；阴影自然比事物要低等，但是天文学家依然会频繁地使用阴影来做研究，因为它为他们的研究提供了许多便利。”（《逃跑的阿塔兰塔》，1618年，189页）在这些充满奥秘的文本中，我们很难跟上作者的思维，但是似乎在迈尔看来，天文学家对阴影的使用是证明暗物质——这个隐藏在物体内部的阴影存在的有力论据。

巴什拉很喜欢阅读有关炼金术的文章。在讲黑体时，我们已经看到他同样关注隐藏在物质内的黑暗幻象。他特别赞赏这个有悖常理的空想：本质的黑可以隐藏在外部的黑之下。在想象中寻找隐藏的黑，需要我们到达黑的最佳藏身之处的中心，才能发现“在黯淡的黑暗中产生的猛烈的黑，创造着深渊色彩的物质的黑”（《土地与对静息的遐想》，35页）。

兹威基认为，我们对一些星系预计的速度和我们所观测到的速度之间存在差距，这个差距本应促使他的同事们考虑这个引出质量缺失假说的异常。如果我们始终处于广义相对论的理论框架下，要解释观测到的速度，实际上需要承认我们已知的物质只是宇宙质量的一小部分。当然，兹威基没有完全受限于这个本体论的假设（通过创造新的物质），如罗兰之前解释过的，他可以修正万有引力定律。这种“立法式”的解决方法尤其受到MOND理论拥护者的支持。如果我们对牛顿第二运动定律进行修正（牛顿第二运动定律确定了力的作用与惯性和加速度相关），说暗物质不存在，这并不是真实现象，而只是由标准理论的不足之处导致的阴影，但是，我们已经在炼金术士关于暗物质的思辨中发现了这种本体论的犹疑。迈尔认为，暗物质是存在的，但它不是普通物质，它只

是一个阴影，因此与宇宙中可以被观测到的物质相比，它是一种类似于非物质的存在："阴影是非常有用的东西，即使它更类似于非物质。哲学家们眼中的阴影就是这样的，是一种比黑色更黑暗的黑。"（《土地与对静息的遐想》，35页）于是暗物质的黑有了一个想象中的特殊性：它是"Nigrum nigrius nigro"，一种比黑色更黑暗的黑。

天体物理学家的暗物质中包含"noire"（黑色的），因为电磁波无法探测到它。我们知道物理学中的黑知识，总的来说，代表着我们无法观察到的东西。然而，与之前物理学赋予黑色的定义相比，我们应该强调：我们无法看到黑洞，但是当它与光相遇，二者就会发生相互作用，黑洞会吸收光线。相反，暗物质绝对不会与相遇的光线发生相互作用，它既不会吸收光，也不会放射光。它只有通过万有引力的形式才会与光和普通物质发生相互作用。因此，暗物质中黑的含义超越了物理学中黑的普通定义，它是一种"比黑色更黑暗的黑"。我们甚至会质疑，"黑色的"这个形容词是否还能恰当地表达一种隐形的、不可触摸的、透明的物质。黑色表达的是一个决绝的隐藏，可奇怪的是，它并不会让我们产生怀疑，反而让我们更坚信它的存在。在我们的想象中，黑色的东西是坚定可靠的。

通过特例假设（甚至在严格的实证主义者看来，是一种形而上学），暗物质源自一种物质化。缺失的质量首先是科学模式中的一个问题、一种异常。如果我们按照英语"dark matter"的说法将暗物质直译为"matière sombre"（昏暗的物质），那只是一个未定的解决方法，但是暗物质不只是一个简单的假设：它在一些科学的论说中获得了不容置疑的真实身份。当我们将暗物质"绘制"出来时，一些人会把它们呈现为对现实的间接观察，而事实上，当我们为了解释观察到的事物而提出假设，这种"绘制"只是严格地通过数字模拟的方式将暗物质呈现出来。因为它被称为"物质"以及"黑的"，于是缺失的质量在想象中也是一种确定的存在。

科学家们假定一些没有被观察到的物质是存在的，这并没有什么值得不满。面对与理论预言之间巨大的差异，科学家们只能在两个非常冒险的解决方法中做出选择：修改理论，或者在现有的理论框架下创造一种新事物。目前我们还无法知道这两种策略哪个更好。然而，不容置疑的是，"黑色的"这个称号在这里并不是中性的：它促使我们做出估计而不是产生疑问。黑暗结合了两种相反的想象动力：它强化了我们对于暗物质存在的信念，同时它又暗示暗物质是遥不可及的。这种比黑色更黑暗的黑是不是一个神秘人诈死的特点呢？还是这只是它蜕变过程中一个暂时的状态呢？

苦炼

在炼金术中，黑化或苦炼只是一个阶段。在它之前是白色的作品，然后是红色的作品，最后会成就一个被寄予希望的伟大作品。在古埃及，俄耳甫斯教和基督教的圣像中，死亡之后伴随着复活，炼金术士们在获取关于物质的准确知识前，会将黑暗的这个步骤看作一个有害的但是必不可少的阶段：“这个物质，黑色的或者被染黑的，是开启一切的钥匙……这个黑暗指示了真正的操作方式，因为这个物质在变化，它被自然中真正的腐败所腐蚀，而从这腐败中会产生一种新的物质。”（贝尔纳·勒特里维桑，《被遗弃的话语》，15世纪初，428页）作为通向最灿烂的华美之物的钥匙，假设暗物质要被很好地保护起来，似乎也很自然。发现暗物质秘密的兴奋之情是非常具有启发性的，将我们的想象再发散一些，似乎天体物理学家在对魔法石的寻求中，与炼金术士达成了一致，这种一致不表现在他们的调查手段上，而是他们都对自己研究的事物有一种迷恋：他们的黑暗物质都是极为重要并且是隐藏的。难道不是因为它很重要所以才隐藏起来的吗？

炼金术士认为，黑暗物质与土星有着紧密的联系，土星是一个将行星与光圈、古罗马时间之神和铅叠加在一起的象征。土星是黑暗物质之“父”，它将黑暗物质保护和隐藏起来，它将黑暗物质制造为一个拒光的，仿佛是封闭起来的神秘物质：

土星的愿望是将这个金色的孩子包围在自己的身体里，不是以灰色的形式，而是用一种黑暗的光辉……土星用自己黑色的外套将他遮盖……它用触及了死亡当中最高级别物质的自由欲望（金体）组成它的本质；然而它并不是死亡，而是一种代表了天上神圣物质的隐藏。（雅各·波墨，《事物的标记》，1621年，29页）

通过烧烤或溶解在酸中得到的黑暗产物是毫无价值的，但是同粪便相比又弥足珍贵，因为这是创造出可以变铅为金的魔法石这个伟大工作的第一阶段。同样，暗物质在开始时也只是用来解释一个令人费解的异常的一个方法，但是它成了天文物理学的一个圣杯，能够解释清楚它的属性的人就向理解宇宙，以及获得诺贝尔奖，前进了一大步。

宇宙的阿尼玛[20]

对于承认暗物质存在的人来说，这确实是一个拂去面纱却并未完全展现的新宇宙：宇宙中的物质比我们所看到的要多得多！因此，普通物质只是真实存在物质的九牛一毛而已。这种理论视角的翻转可以与无意识生命的心理分析发现相比：我们意识到的存在只是在我们精神中出现的一小部分，我们所做的很多事情都无法由我们的思考和有意识的决定来解释。卡尔·荣格的服从精神分析坚持认为，只有当我们能够接受自己真实性格中被压抑的阴影部分，以及不安和危险的那些方面时，我们才会意识到自己的真实性格。荣格将我们心理中的这一方面称为阿尼玛，一个阴暗的隐藏的灵魂，与阿尼玛斯[21]不同，它是我们个性中被接纳、有价值且积极的那一面。

虽然阿尼玛是人类心理中被动而阴暗的那一部分，但它却是最重要的。如果我们做一个类比，那么，暗物质就是宇宙中的阿尼玛。

荣格在炼金术士的书中找到了很多这种心理基本二元性的表现形式，通常表现为雌雄同体。炼金术士的文字和版画中充斥着这样的原型，对于精神分析学家来说，它们是非常宝贵的材料。炼金术并没有真正被实验所限制，它用各种符号进行着游戏，在这个程度上，它可以自由地将集体无意识的原型投射在炼金术的“物质”上。然而，就暗物质的属性而言，天体物理学中也缺少实验的参照点。它发现了一块处女地，这是最具思辨性的粒子物理学所乐见的。事实上，为了弥补巨大的质量差异，天体物理学家首先寄希望于他们所称的“昏暗的物质”上，也就是很难被发现的传统物质，比如白矮星、褐矮星和黑洞。通过这些词组我们发现，这些星体赋予了暗物质一点色彩。但是这并不够，还差得远呢。于是他们呼吁粒子物理理论学家们发明各种各样的外来物质，也就是说，与已知的物质不同，却可以合理地存在于一些理论框架下。于是宏观宇宙和微观宇宙之间建立起了联系。

因此，会出现“冷的”暗物质（其速度低于光速），是由大质量粒子所组成的，但由于这些粒子与其他物质相互作用非常少，因此到目前为止还没有被探测到。同时，也会出现“热的”暗物质（其速度接近光速），已知的三种中微子是它的组成部分。最后，还会有“温暖的”暗物质，它的主要组成部分是第四种中微子，“无效”中微子（我们称之为无效，是因为它不会与物质产生相互作用，并且无法被探测到）。另外，一些炼金术士也会拿他们关于古代原子论中暗物质的猜测做比照：“因为你肯定会很快看到所有如煤炭般的黑色，以及你的化合物中所有成分都会变成原子，你就为此感到欢欣吧。”（乔治·斯塔基，《通过国王封闭宫殿的开放入口》，1645年，672页）这些原子是德谟克利特原子、伊壁鸠鲁原子和鲁克丽丝原子。它们只在形而上学中存在。

对于天体物理学家来说，寻求与物理学的另一个分支达成一致的唯一途径就是进步，可以先验地说，这个方法意味着新的约束。然而，关于暗物质属性假设的增多也带来了麻烦。继续做一个不太礼貌的类比，我们可以猜测粒子物理学家被迫创造出太多的外来粒子，以填补天文物理学家的缺失质量，这种方式就和炼金术士赋予黑暗物质很多名字和符号一样，他们这样做只是为了掩盖这些物质在自然界中不存在并且在他们鼓吹的炼金过程中也无法产生的事实。于是黑暗产物也被称为“黑色的树脂”“燃烧的盐”“熔化的铅”“不洁的黄铜”“氧化的镁”“让的乌鸦”“西方”“黑暗”“霉斑”“死亡”“水星的腐化”，或者是“哈迪斯冥王”。不言而喻，当树脂、盐、铅、黄铜、水星或者氧化镁的首字母都大写后成为术语，这些术语的含义就和它们原来所指的普通事物不一样了。

“乌鸦的头”也是一个经常出现的词组：似乎在“腐化”过程的一个阶段，蒸馏瓶中所含物质的一部分必然会挥发成一种黑色蒸气；因为乌鸦是“黑色的鸟”，所以这种物质被命名为“乌鸦的头”……尽管如此，这个名字也和神话有关：乌鸦也是一种与柯罗诺斯有关的鸟，柯罗诺斯是古希腊人的时间之神，与拉丁人的农神相对应，也类似于斯堪的纳维亚人的生命、死亡、战争和魔法之神奥丁，伴随他的是两只分别象征思想和记忆的乌鸦。词汇的丰富性和符号的连贯性掩盖了物质参照的空洞。每一个炼金术士都无法解释清楚他所说的是什么，诚如沉迷于炼金术研究内容的专家所说，一个炼金术士只要能够清楚地表达自己，他便不再配得上炼金术士这个头衔。从本质上讲，炼金术是一种隐藏自己假装知道的秘密的艺术。

天体物理学家和粒子物理学家在寻求宏观质量和微观世界变化之间的结合时，透明度在其中发挥了作用。他们对暗物质的探寻同样是不确定的，粒子加速器有效地取代了蒸馏器，但有时实验也会失败。因此冷的暗物质应该由“对称”粒子组成，也就是说，我们会给每一个玻色子对应一个费米子，反之亦然。这些新的粒子迄今为止从未被观察到，尽

管“超对称性”已经预测出它们的存在——“超对称性”是粒子物理学家通用的标准模型的扩展。可是截至目前，欧洲核子研究中心（CERN）使用大型强子对撞机（LHC）依然没有发现它们，于是一些理论家认为这个理论可能是“死了”。

热的暗物质是由已知存在的粒子——中微子组成的，但是它们的数量和质量只能解决一小部分缺失质量的问题。至于构成温的暗物质的无效中微子，只有在转化为另一种中微子时才会与物质发生相互作用，因此我们无法直接观察到它。核电站的中微子流量有轻微的不足，只有这一点可以证明它的存在。但是由于这种温的暗物质数量很少，也不足以解释巨大的缺失质量。暗物质当然是解决缺失质量问题的一个方法，但是这个方法本身就是有问题的：它是用黑暗来解释黑暗的，即“obscurium per obscurius”。

在这个关于暗物质的遐想结束时，天体物理学家们的黑概念已经变成了一个奇怪的、让人联想到炼金术妄想的黑色形象。我们不要忘记，如果说炼金术中黑暗的作品会让我们想起天体物理学中暗物质的隐秘图像，这是因为科学概念的作用恰恰是要隐藏这些图像。如果我们拿科学的不确定性与炼金术的幻想做比照，则必然招致科学家以及神秘的“炼金术士”的反对。目前，虽然在物理学家们的努力下，我们依然无法看到暗物质，但是这并不意味着我们提出的是一个错误的假设。虽然炼金术确实与科学无关，但其对于一些符号的思考可能创造出一种智慧的形式。

然而，在认识论专家和精神分析学家看来，暗物质似乎是一种仓促而可疑的实体，他们认为，最好继续讨论“缺失的质量”问题，并且记住这是一个公开的问题。然而，MOND作为另一个重要理论也会带来一些困难，而对物理定律进行修正是一个不容轻视的选择。

至于探寻暗物质的精神观点，我们要知道，炼金术不只是一个江湖骗子和投机取巧的黄金商人的技艺。在荣格看来，这也是一种传教式的话语，让人们可以在自我与心灵的无意识倾向中达到契合，来理解自己生命的成熟过程。如玛格丽特·尤瑟纳尔（1903—1987）在她优美的小说《苦炼》的标题中表达的那样：“我们依然在讨论，这种表达方式是否适用于对物质本身的大胆实验，还是说它代表一种将思想从常规和偏见中解放出来的精神测试。”这里有一个美好的用语——“将思想从常规和偏见中解放出来”，这应该是思想在黑暗中摸索前进时的指引线吧。

Part 5



A　暗能量

它如夜晚、如真空般黑暗。

它像是一张底片。

——约瑟夫·布罗茨基[22]，《山丘》（*Collines*）

宇宙学旨在构建一个对可观测宇宙的严密的描述，这个可观测宇宙也就是所有可以通过光与我们进行相互作用的东西。它是一个以我们为圆心的球体的内部，它的半径约为450亿光年，包含数千亿个星系。为了描述这个我们观察到的整体，宇宙学构建了一个模型，一个基于目前关于地球以及我们对宇宙观测的实验所验证出的物理规律和知识的理想化描述。当代宇宙学模式有一个更加大众化也更为人所熟知的名字是“大爆炸模式”，这个模式建立在阿尔伯特·爱因斯坦在一个世纪以前提出的广义相对论的基础上。在这个模式中，万有引力是以几何学的方式、用弯曲的时空来描述的。具体来说，虽然自由落体运动在牛顿理论中被解释为万有引力，但在爱因斯坦理论中，它被理解为弯曲时空中较短的路径。时空的几何形状确定了物质的运动轨迹，反过来，物质的内容造成了时空的变形。广义相对论方程将时空的几何形状和物质内容密切联系在一起。只有通过一个双重假设才能求解这些高度复杂的方程式：宇宙的几何和物理特性，在一个特定的时刻，在所有的点以及点周围的所有方向上都是相同的。换言之，宇宙是同一的、各向同性的。1915年，爱因斯坦引入了“哥白尼理论”，之后俄罗斯天文学家亚历山大·弗里德曼（1888—1925）和比利时天文学家乔治·勒梅特（1894—1966）分别于1922年和1927年引入了这个理论，“哥白尼理论”将我们引向了简单的宇宙学模式：在任何时刻，空间的几何学特点，尤其是它的曲率，在所有的点和方向上都是相同的。然而，曲率会随着时间而变化，这给这些模式带来了意想不到的动态特征：空间可以膨胀。1917年，爱因斯坦正是基于他的广义相对论框架构建了第一个宇宙学模式。他深信宇宙是静止而永恒的，但他又发现通过他的方程式最终会得出一些动态的解决方案。为了得到一个与他的哲学信念相一致的解决方案，他不得不将一个常数引入他的方程中，这个常数是唯一被核准的，名为“宇宙常数”。

几年之后，在1929年，人们证实了大范围距离的宇宙动力学。

美国天文学家爱德温·哈勃（1889—1953）观察到，来自遥远星系的光的频率会发生红移。这个现象是多普勒效应造成的：当发射机与接收机之间的距离变大，声音或电磁信号的波长会发生伸展。爱德温·哈勃

在可见的逃逸速度和星系距离之间建立了一种比例关系，即“哈勃定律”。在广义相对论的框架下，哈勃的发现可以被认为是宇宙膨胀的结果：空间发生了伸展，于是我们感觉星系之间的距离变大了。哈勃定律的比例系数被称为“哈勃常数”，这个常数量化了宇宙的扩张速度，其精确程度可以达到1%：约为每秒21.3千米比100万光年。根据哥白尼原理，现在一个从另一星系观察宇宙的观察者将获得相同的结果，特别是他会测算出与哈勃常数相同的值。然而，这个宇宙学原理并不意味着过去观测到这个常数的人现在会得到相同的结果，因为哈勃常数会随着时间发生变化。

爱因斯坦只在20世纪30年代初承认了宇宙膨胀的现实，因为这是他的理论结论，但同时也否定了他的宇宙常数。于是，宇宙常数失去了原本存在的理由，并被动态宇宙模式所替代。虽然爱因斯坦抛弃了宇宙常数，它却吸引了其他天体物理学家的注意，因为它可以解决宇宙年龄的问题。当时，没有参照宇宙常数的模式计算出的宇宙年龄约为20亿年，而通过地球化学测量法推导出的地球年龄为45亿年。在勒梅特关于宇宙学解决方法的系统研究中，他注意到宇宙常数可以暂时地“冻结”宇宙扩张，从而校准宇宙的年龄，以便严密地进行时期观察。在之后的几十年里，关于宇宙常数的讨论仍在继续。宇宙学家遇到的问题是尺寸。宇宙的年龄是通过估计哈勃常数和可观测宇宙的物质内容来确定的。不幸的是，哈勃常数的测量值和物质内容的清查会根据观察结果发生变化，这使得宇宙年龄的问题也瞬息万变。自那之后，宇宙学家开始做一个系统的清查，目的是对宇宙的每一个组成部分进行编目和“称量”，最新的数据来源于大型星系目录，以及主要由欧洲的普朗克卫星发回的对宇宙微波背景的观测结果。

令人惊奇的观测结果

20世纪90年代末，有两支团队已经开始测量过去宇宙扩张的速度，这两支团队分别由来自加州伯克利大学的索尔·珀尔马特，以及来自澳大利亚堪培拉大学的布赖恩·施密特和来自伯克利大学的亚当·里斯领导。为此，他们观测到远在数十亿光年外的超新星（SNIa）的光通量。这些恒星的爆炸非常有趣，因为它们的最大亮度是可重现的。因此，对它们的可见的光通量的测量等于测算爆炸时发射的光子所经过的距离——这个距离取决于宇宙的几何形状和内容。对这些遥远的SNIa的观测显示，在仅由物质构成的宇宙中，它们可见的光通量比预期的要弱得多。这些超新星的光所经过的距离也比预期的要远——宇宙膨胀的速度似乎加快了。发起这些研究的人因此获得了2011年诺贝尔物理学奖。由于结果出人意料，研究人员开展了关于遥远的SNIa的新研究，其中包括对超新星遗留物的探测调查（SNLS）。从2003年到2008年，通过直径为3.6米的加拿大-法国-夏威夷望远镜，SNLS发现了数百个河外SNIa，而之前的观测数据则约为50个。科学家们为此做出了巨大的努力，因为SNIa很少见：对于一个类似于银河系的螺旋星系来说，几乎一个世纪才会有一次爆炸。在清查结束时，SNLS已经掌握了约500个SNIa，这些超新星采集自过去20亿至80亿年内的宇宙。这些测量表明，在仅包含物质的宇宙中，来自遥远的SNIa的光通量被证实的确低于预计通量。它们与宇宙处于加速膨胀的假设相符。

对于研究者来说，我们必须承认一种能够加速膨胀的能量成分的存在，它既不是物质也不是辐射。爱因斯坦的广义相对论方程中可能包含这样的一个成分，作为属于平等的“物质含量”方面的附加术语。这个未知的能量成分被称为“暗能量”。事实上，爱因斯坦已经在他的方程中引入了与暗能量相对应的数学术语，以便使这些方程获得静态的解法，这是伟大的物理学家赋予这些解法的特权。于是这个数学术语被指定为“宇宙常数”，它作为方程式中与“几何”相关的部分出现，并被解释为时空的一个属性。但讽刺的是，在哈勃发现宇宙扩张之后，它马上就被抛弃了，而宇宙的加速扩张则需要重新引入宇宙常数这个概念。因为只需调整宇宙常数的数值就可以解释宇宙的加速扩张。

解释的过剩

从物质的角度讲，暗能量是什么呢？它在爱因斯坦的方程式中的出现，可能意味着一个新的物理元素的介入，其属性与普通物质非常不同。例如，随着时间的推移，暗能量的密度保持恒定，而普通物质的密度则会由于宇宙膨胀引起的稀释而降低。由于暗能量的密度不变，宇宙的体积因为宇宙的膨胀而扩大，所以它必须不断地被创造出来。它还具有另一个奇怪的属性：和普通物质不同，它的压力是负的，与能量密度完全相反：它加快了膨胀的速度，而不是使膨胀缓慢发生。

由于宇宙学的观察，我们才能估计暗能量的密度。它的密度非常小：为了给100瓦灯泡供电10秒，我们需要收集10立方千米体积内包含的能量！然而，它却是宇宙构成的大部分内容：它的密度约占宇宙内容的68%，而物质只占32%（暗物质占27%，普通物质占5%）。这意思就是，宇宙中95%的组成内容是当前物理理论所未知的成分。标准的宇宙学模式对可观测宇宙进行了很好的描述。然而，物理学家依然需要更多关于这些被认为可以解释观察结果的实体的描述，他们甚至认为这个模式还有存疑之处。

从这些特性的推论中，物理学家已经想象出暗能量的可能属性。第一种可能性出现在量子场论的框架内，量子场论通过结合场的概念（如电磁场）以及量子物理学的规则来描述粒子及其相互作用。于是一个粒子被描述为一个量子，也就是其与相关场的基本激发。同样，真空被定义为能量最小的场，其能量不必一定为零。真空便不再是我们消除了物质和光线、时间和空间所呈现的状态，而是场的状态的一个特殊结构，也就是包含0个粒子且能量最低的结构。根据德国物理学家维尔纳·海森堡（1901—1976）提出的不确定性关系，这个特殊状态可以像其他状态一样是波动的。这些波动会产生所谓的零点能量，可以简称为真空能量。

在这个现代的观点中，真空，也就是量子场的最低能量状态，包含两个部分：真空能量，以及一个由场之间相互作用产生的势能。这个势能与温度有密不可分的关系，因此它可能随时间的流逝而变化，而这只是因为宇宙在扩张时会发生稀释和冷却。有趣的是，真空对于所有处于统一直线运动中的观察者来说，其出现的方式是完全相同的。这个对称性源自爱因斯坦的相对论原理，它意味着自身与负压有关，并且它的能量密度是恒定的。因此，真空能量与暗能量完全相同。所以，真空能量是宇宙能量的密度的一部分，可以使宇宙迅速扩张。真空能量和暗能量只能是同一个实体。可惜的是，科学家计算出真空能量的密度值比暗能量的密度值高120个数量级！在物理学研究中，预测和观察结果之间从来没有过如此大的差距。

在发现宇宙加速膨胀之前，在科学家们倾向于认为宇宙常数为零的

时代，真空能量的问题就已经被提出来了。因此，我们计算出的真空能量密度必须为零，而这与我们之前提到的估计是矛盾的。解决这个矛盾的一种方法是在量子场理论中引入一个“超对称性”。量子场理论规定，标准模式中的每个基本粒子，如夸克或电子，都有一个“超对称伙伴”。这些成对的粒子具有相同的质量，不同的自旋，它们对真空能量的分摊额会相互抵消。因此，不必进行人为的调整，真空的能量就为零。不幸的是，宇宙似乎不是超对称的，因为，以电子为例，它就没有相同质量的超对称伙伴。如果超对称性是相关联的，它就必定会被打破，那么超对称伙伴的质量会比预期的要高。然而，即使在这种情况下，真空能量的密度值仍然比暗能量的宇宙学测定值高60个数量级。

其他物理学家设想出了可以造成宇宙加速膨胀的替代物质内容，人们将这些内容统称为“第五元素”。例如，一个标量场（自旋为零的场）的存在可能导致宇宙膨胀的加速，第五元素模式和观察结果是兼容的。然而，第五元素的短时演变与暗能量稍有不同，因为它不具备相同的状态参量。因此，我们试图以更高的精确度来测算这个参量，它等于能量密度和压力之间的比率（在所选单位内，这个比率是没有维数的）。对于暗能量来说，它等于-1，对于第五元素模式而言，它则不等于这个数值。于是相关的能量密度不再是恒定的，而是会随着宇宙的发展发生变化。这正是宇宙学家想要强调的时间变化。

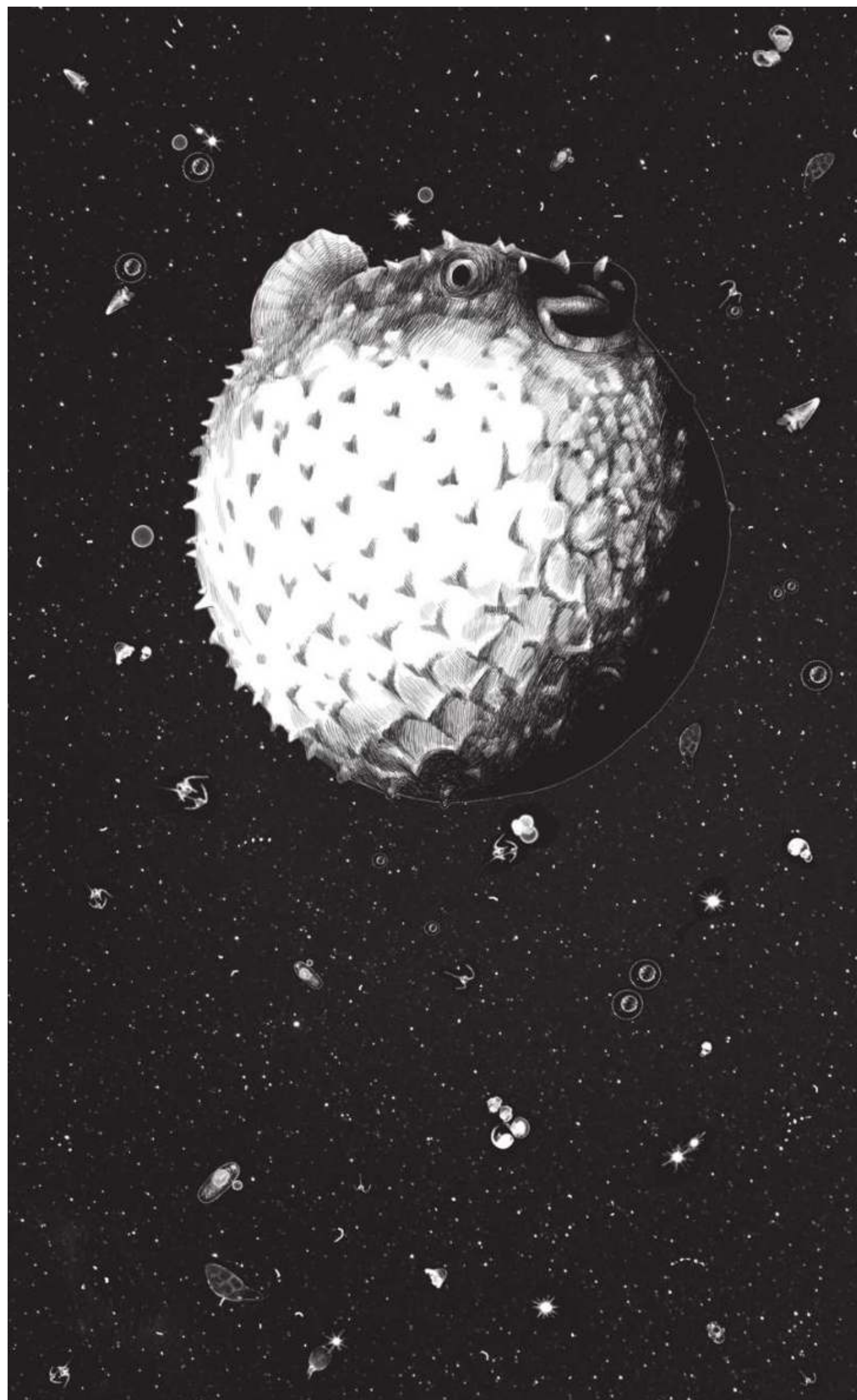
之前提到的模式假定广义相对论可以正确地描述宇宙范围内的万有引力。但事实也许并非如此。物理学家经常遇到对引力的观测结果与被认为造成该结果的物理元素之间不协调的情况。对于这种情况的解决方法就是，探测出新的物体或者修改引力理论。因此，得益于天文学家奥本·勒维耶的计算，我们发现了海王星，勒维耶曾经通过假设海王星的存在来解释天王星运动轨迹的异常。这一点我们在介绍暗物质的章节中曾经提到过。勒维耶试图用同样的方法来解释水星近日点一百年一次的前进现象。但是他并没有成功。在他死后，这个轨道的异常被一种新的引力理论所解释—爱因斯坦的广义相对论。当代宇宙学面临着类似的困境：我们是否应该通过引入新的黑暗物理元素（暗物质和暗能量）来确保万有引力定律的正确？或者我们应当试图修正万有引力定律来解释这些观察结果？

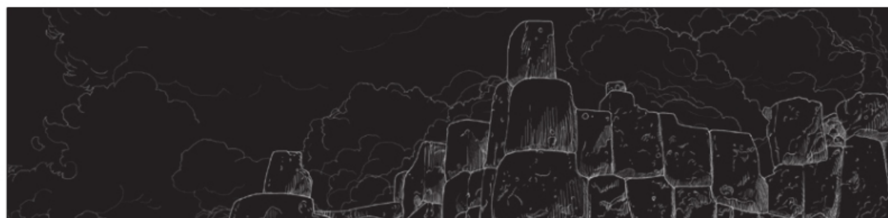
有一种关于修正万有引力定律的方式是，假定我们的四维空间还拥有一个补充的维度，一个伸展向无限的第五维度，只有引力子——驱动引力相互作用的粒子——才能在这个补充的维度中传播。由于如光子这样的其他粒子无法进入这个补充维度，因此我们通常的测量无法涉及它，但它可以通过自己对引力的影响显现出来。宇宙学的影响是非常重要的。在小范围内，引力子逃逸的可能性很小，广义相对论的方程式正确地描述了万有引力。在更大范围内，一定数量的引力子逃逸到第五维度，广义相对论的方程式不再匹配。如果我们假设广义相对论是有效的，那么大范围内的物质的引力效应是被高估的，这个引力效应给人的印象是宇宙的膨胀速度在加快。这个模式得到了众多宇宙学家的响应，但它却带来了很多理论和实验上的难题。我们要强调的是，在远距离修

改广义相对论，同时又要承认该理论在普通范围和太阳系范围内的精准测试，是非常困难的。

我们也设想过抛弃宇宙学原理。如果对宇宙微波辐射的观察结果倾向于证明宇宙实际上是各向同性的，那么大范围内的同质性仍然值得讨论。由超新星运动的同质性推导出来的膨胀加速，可能是由局部非同质性引起的。因此，我们不应该将宇宙学重新建立在弗里德曼-勒梅特的空间，而应该建立在托尔曼-邦迪的空间上，因为这个空间的主要特征是拥有一个在围绕中心的空间中发生变化的曲率，这个中心在宇宙中占据特殊位置。这些都是尚未被充分利用且仍然处于分散状态的猜想。

以上我们未能列举全部关于解释宇宙膨胀加速的方法，这说明对这个现象制定出一个物理理论是非常困难的。目前，尽管暗能量是最为天体物理学家所接受的假设，但我们之前所提及的方法都没有得到一致通过。关于解释宇宙加速膨胀的问题催生了许多研究，这些研究有助于我们更好地理解标准宇宙学模式。未来我们将得到的数据，尤其是来自欧洲Euclid卫星计划等主要观测计划的数据，应该会让我们排除掉一些无效的研究方法，帮助我们更好地理解暗能量的奥秘，以及极大范围内万有引力的特性。迄今为止，造成宇宙膨胀加速的原因仍然是一个悬而未决的问题。





B　暗能量之谜

哲学家对事物的内在属性和原因有着模糊而不确定的猜测，他就像“一个盲人在黑暗的房间里寻找一只并不在房间内的黑猫”。

——威廉·詹姆斯[23]，《一些哲学问题》（*Quelques problèmes de philosophie*）

巴什拉认为，一个将自己的遐想扩展到宇宙空间的梦想家，自然会进入宁静从容的状态：“在关于宇宙的遐想中，有一条中轴线，沿着它，感性的宇宙转化为美丽的宇宙。”（《梦想的诗学》，1960年，157页）是这样一个和谐平衡和永恒稳定的梦想激发了爱因斯坦关于宇宙常数的灵感吗？它不是应该可以抵消万有引力的影响并防止宇宙崩溃的吗？通过给宇宙几何学增加一个术语，爱因斯坦认为他保证了一个同质和静态的状态，也就是巴什拉所说的“安宁”：“安宁是存在本身，它属于这个世界，属于它的梦想者。”（《梦想的诗学》，149页）在宇宙中，存在两种对称的威胁：消失和无限扩张。通过宇宙常数，爱因斯坦已经确定了这两者之间脆弱的平衡点。但是这个梦想破碎了。天文学家通过观察发现，两者间的天平在向宇宙扩张的方向倾斜，然后，更令人惊讶的是，天平转向了一个我们意想不到的方向：膨胀加速。于是这个谜团的颜色，自然变成了暗能量的黑色。

爱因斯坦说，我的方程式像是“一座建筑物，它的一边由精细的大理石构成（方程的第一端边），另一边则由劣质的木材搭建（方程的第二端边）”（《物理学与现实》，1936年，370页）。大理石代表着几何学，以及时空的曲度，而劣质的木材则是宇宙物质内容的象征。然而在希腊语中，木头是hylé，它也表示所有的物质。爱因斯坦所说的木头使我们想起了被柏拉图学派的哲学家们称为“第一物质”的东西，它是所有事物的没有区分的底物，是一种没有自己特点的、无形的、混乱的、模糊的物质。

几十年来，科学家们一直忠实于这块坚定的大理石，他们已经满足于宇宙常数以及它的几何非实体性。然后，有一天，也可能是一个夜晚，他们厌倦了扭曲时空的网格，他们穿过了代数的卢比孔河[24]。他们用自己的方法将hylé变成了一种可塑的材料，他们重新开启了丰富的本体论的潘多拉魔盒。于是，一个梦幻般的、令人不安的想象的力量被释放了，这个想象是关于最后一个也是最强大的黑色形象—黑暗。

只需进行简单的数学操作——通过将一个代数术语换到等式的另一

边来改变它的符号——就可以让它的含义完全改变。这是一种在数学中很常见的实验，通过对一个方程的术语进行盲目操作来获得进展。安德鲁·怀尔斯（1953— ）在他1996年的一次访谈中解释道，数学研究就像是在一个黑暗的房间中摸索着探测："你走进一间房间，你处于黑暗中，完全的黑暗，你偶尔会撞到家具，然后，渐渐地，你知道家具的位置了，最后在大约六个月后，你找到了灯的开关。" 另一位伟大的数学家将它比作探索被黑色面纱覆盖着的景观："这个黑色时期标志着一个数学家踏入未知领域的第一步，这通常是周期的第一阶段。在黑色之后，出现了一道小小的微弱光芒，这让我们觉得某件事情即将发生。"（赛德里克·维拉尼，《有生命的定理》，264页）数学家非常清楚如何驯服黑暗。只有当他在黑暗中停留的时间过长，他担心在夜晚错过了一个岔路口，或是冒险走上了一条什么都没有的路的时候，他才会预感到有问题。当所涉及的不再是纯粹的数学时，在物理学上呈现出来的也将完全不同。因为即使在最理论化的物理学中，针对符号的某一项操作也会导致难以理解的形而上学的结果。于是，将方程式中的一个端边转换到另一个端边，可以将宇宙常数转化为一种神秘的暗能量，反之亦然。

"暗能量"是对dark energy这个短语最常见的一个译法，这个短语是德雷甘·亨特和迈克尔·特纳于1998年提出的，用来表示宇宙膨胀加速的可能原因。在法语里，形容词"黑暗的"和"能量"并列使用，与我们之前研究的案例相比，这个形容词包含着创新的意义。它不仅仅指探测的难度，还指出了我们对所说现象属性的无知：在暗能量的作用下，我们真正陷入了黑暗之中。以至于为了确定这个现象的属性，去参照与这种"能量"截然相反的东西，即与万有引力相反的斥力。于是"黑色"具有了一种前所未有的含义，它既是隐喻性的——表示认知的缺乏，也是思辨性的——表示纯粹否定定义的黑暗。哲学家和神学家知道这个短语，它通过列举自己不是什么来定义一个形而上学的实体——它是负面本体论的修辞。在承认理性已经达到极限，以及理性会出现无法表达或出现错觉的情况之前，这个方法一直被认为是最后的手段。

所以，能量的黑暗是神秘的。它标志着意义的反转：暗能量是与引力相反的能量。它的消极性使得它在某种意义上类似于黑弥撒的黑暗，黑弥撒是邪恶的仪式，其中使用的祝圣象征被认为是一种用来乞求魔鬼的亵渎和颠覆。这个黑暗的关联，理性的人对此嗤之以鼻：暗能量与巫术中使用的邪恶图像毫无联系……我们确定吗？

黑暗的教训

我们所讨论的能量仍然具有令人生畏的控制力：相较于其他宇宙力量，它逐渐占据上风，并迫使物质在无限延伸的宇宙中被稀释。从长远来看，星系间的距离是如此遥远，以至于它们将像孤岛一样漂浮在无边的黑暗海洋中。我们不再可能知道其他世界的存在，因为它们被推到视界以外的空间，甚至关于宇宙的概念已经消失或只是一个神话。这些黑暗的梦纠缠着被拖入关于暗能量的想象旋涡的人。它把整个宇宙都推向末日的黑暗。黑暗象征着宇宙的夜晚，一切未区分的、恐怖的事物。以米尔恰·伊利亚德（1907—1986）为代表研究这些象征的专家表示，黑暗不是具有完全否定意义的，它们具有潜在性和丰富的根源。《圣经》上讲，上帝是从原始的黑暗中、在孤独和混乱中、在混沌中创造了世界。但是这里说的黑暗出现在世界之前。相反，暗能量就像一台黑暗的发动机，开始时它的影响无关紧要，但随着时间的推移，它的影响力不断攀升。我们所说的黑暗并不是指对原始黑暗的想象，而是对最后的黑暗的想象。伊利亚德在关于“古老宗教中黑暗的象征主义”的研究中强调了这个极性：黑暗象征着一切先于存在出现的东西，它象征着无尽的虚无——它们类似于原始的混乱，在这混乱中任何形式都无法被分辨，在这个存在的前个体阶段，任何存在的结构尚未出现——但它们也象征着世界湮灭之后的一切，当个体重归枯燥的空洞，与虚无无异时，黑暗在个体消失之后仍然存在。受到暗能量影响的黑暗属于最终的消极的一面。如果它们不是“乌有”，它们仍然象征着存在的不可能性和世界末日。

谁会杀死宇宙？

和巴什拉一样，伊利亚德拿黑暗的流动和水的流动性做比照：世界的坚固程度并不比一颗孤独的水滴更高，接下来，很可能就会蒸发不见。此外，神话对创造世界的描述，就像一座由水构成的岛屿的出现，注定像未来的亚特兰蒂斯一样重新回到水元素中。亚洲、大洋洲和美洲印第安人的宇宙起源说用一些类似于饕餮的形象来描写黑暗向光明转变的过程：饕餮是一种黑色的怪物，阳光或一个发光的孩子从怪兽的嘴中逃脱出来。然而，这个噩梦一定会在我们生命结束时再次来到我们身边，古老的宗教会赋予这个中止我们生命循环的黑色怪物一个名字。但是，在末日的最后，那个将整个世界吞噬在自己黑暗的口中的怪物，我们又应该怎么称呼它呢？在某种程度上，宇宙学家已经开始了针对黑暗的征程，因为他们想要解开这个谜团。只是看到宇宙正在死亡对他们来说是不够的，他们想要知道是谁杀了它。正因如此，他们对暗能量的探寻让我们想到了黑小说当中的某个情节。

“黑小说”这个词组代表了两种不同的文学种类：一种是出现于18世纪英格兰的哥特小说（代表作家有霍勒斯·沃波尔、玛丽·雪莱等），在这种小说中会突然出现一些可怕的生物；另一种是“一战”后美国的侦探小说（代表作家有达希尔·哈米特、雷蒙德·钱德勒等），其中叙述了“辣手神探”浑水摸鱼式的调查。事实证明，对暗能量的探寻使我们想到黑暗的两种形式之间的结合——梦幻和罪恶的结合。

研究宇宙膨胀加速的物理原因，有时会让我们想起一个包含很多叫不出名字的怪物的恐怖故事。大量的假设会带来一个奇怪的本体论：一些理论家提出了“幽灵能量”的概念，这个能量有一种奇怪的特性，在宇宙膨胀期间它的密度会增加，就好像随着恐怖故事的发展，阴影会变得更厚一样。其他天体物理学家之所以给出“第五元素”这个命名，是因为它与四种已知形式的物质能量截然不同（重子物质、光子、中微子和暗物质），这样的命名方式与恩培多克勒和古代炼金术士将以太看作不同于火、水、空气和土地的第五元素的方式类似，但是如果物理学家对恩培多克勒的宇宙起源说有更多的敬意，他们应该将它称为“仇恨”，因为这是分离一切事物的力量的名称：“仇恨所引发的斥力会将每个人分别带走。”（《斯特拉斯堡誓言》）当量子真空的能量被用来解释暗能量时，它通过将广义相对论和量子力学进行融合，建立起微观宇宙和宏观宇宙之间的联系。另外，暗能量会让我们想起“力量阴暗的一面”。还有其他一些更加“骇人听闻”的假设，但没有一个令人满意。尽管有很多线索，但关于暗能量本质的研究却令人沮丧和不知所措。

因此需要提到的是，美国的黑小说，属于“黑色系列”的小说，也不同于经典的解密小说，因为它无法保证有一个美好的结局。更糟糕的是，甚至无法保证谜题在最后被解开了。有时主人公失去幻想，跟踪失败，让罪犯逃走……悬念达到了顶点。我们对暗能量的遐想可能会变成

对一种难以捉摸的存在的追寻。但是我们不应该这么快就丧失信心。在想象中，我们的调查几乎不用关心隐藏在黑暗中的事物是否存在。我们只要相信它们在就可以了。因此，我们要找到一个假想的事物，它就是我们要寻找的罪魁祸首：一个黑色的、强大的、不吉利的事物，是它导致了世界的黑暗，它还能让光明化为乌有。

众所周知，北欧神话的特点是总会以一场巨大的战斗收尾，最后几乎所有的神、巨人和男人都会死亡，这被称为诸神黄昏。战斗之前有三个没有太阳的冬天。第一次提到这个世界末日是在《诗体埃达》（13世纪）中：芬里厄狼以及它的儿子哈提和斯库尔分别吞噬了星星、太阳和月亮，让世界陷入黑暗。因此，芬里厄狼是理想的嫌疑犯。当它被北欧诸神收养时，它还只是一只小小的狼崽，然后它开始迅速地长大。当北欧诸神得知它会毁灭神族时，他们认为要锁住它，他们使用的链条是黑暗精灵用一些不再存在的物质制成的（猫的脚步声、女性的胡须、山的根、鱼的气息等）。被主人欺骗，被捆绑到时间的尽头，我想我们可以理解芬里厄狼为什么会积累一股可怕的报仇欲望。杀死奥丁，吞噬星斗的芬里厄狼是理想的罪犯。

但是这里有几个细节不太说得过去……首先，芬里厄狼不是黑色的，它是灰色的。如果说黑色是北欧众神中某一个人物的特点，那么它应该属于夜晚女神诺特——巨人纳尔弗的女儿。她乘着一匹黑马拉着的二轮车遨游天空，在她之后，她的儿子白昼之神达古给大地披上玫瑰色的光辉。她一点也不像罪犯。因为这黑暗在北欧人看来与邪恶无关，如我们之前所说，奥丁的两只乌鸦就是黑色的。其次，《诗体埃达》中攻击芬里厄狼的证词并不是非常可信。它是很晚才被一位冰岛的牧师撰写出的，此时多神教在面对基督教的挑战时已经失去了自己的阵地，里吉斯·博耶认为这个作者怀有偏见，他难道不是要摧毁所有的异教神，以表示旧信仰的时代已经结束了吗？他难道不是因为受到《圣约翰启示录》的启发吗？所有这些都表明，芬里厄狼的罪行可能已经被完全夸大了。

换句话说，这可能是一个诽谤性的谴责。要解决这个疑问，应该决定宣告芬里厄狼无罪。

那其他的嫌疑人都有谁呢？在埃及诸神中，巨蛇阿波菲斯是黑色的，是在一天结束时吞噬太阳的躁乱化身。它应该去承认被指控的罪行，因为它非常想要吞噬太阳。但是所有的证词都描写到，太阳神拉在赛特的协助下，将巨蛇打得落花流水，它最后甚至被猫女神芭斯特切成碎片。总之，它尽可以自吹自擂，每次它都会遭到重击，只有在日全食期间才能短暂地占据上风。然而，埃及神话给出的线索并不止于此，因为人们可能会有疑问，阿波菲斯是否只是用来转移我们对另一个更强大的神的怀疑，真正的罪魁祸首难道不是赛特吗？他有一张黑色的嘴；据说他是“力量之主”；他娶了死亡女神奈芙蒂斯；他杀了自己的兄弟欧西里斯，并把他的手下驱赶到世界的各个角落；他还娶了狩猎女神阿娜特和爱的女神阿斯塔蒂；他还迫害他的侄子荷鲁斯；还有传说讲到，阿波菲斯不是他的敌人，而是他的伙伴！赛特这个阴谋家让大家相信，他要

对抗黑暗的力量，并将攻击阿波菲斯的行动推给太阳神拉，于是他秘密地策划了黑暗战胜太阳之光的最终胜利。

赛特是如何回应这个指责的呢？首先，他不是黑色的创造物：我们称他为“红色之神”。其次，他有很多美德的表现：对拉美西斯皇室来说，他是一种残酷的却非常积极的力量。最后，他声称是因为这种以貌取人使他受到不公正的对待：他是外族人和红发人的神，他掌管着沙漠的干旱和贫困、雷声和闪电，以及一切打破了既定的秩序和受到迫害的东西。他是双性的神，是长着豺的头的神，是未被赏识的神。总之，他打乱了所有这些线索，由于缺乏证据，我们也只得宣布他无罪。

下一个要传唤的嫌疑人是古希腊神话中的黑夜女神倪克斯，她就住在案发现场——“东方的边界”，世界的尽头。但她有一个不在场的证据（她经常旅行），并且她没有力量获取众星的权力。事实上，神话中的任何造物都是没有力量的（或者应该说是抵消的力量，因为我们要体现的是反重力）。再多的寻找也是徒劳，我们无法在神话中找到一个能够象征最终黑暗的有力形象。

实体的迷幻

让我们回到出发点：对能量的拟人化是不是一个错误的路径呢？是否不知名的宇宙常数才是真正的罪魁祸首？一旦宇宙常数的数值发生变化，它就会加快宇宙的缺失。可是它太抽象了，没有物质的相关性，这打消了我们的疑虑。只要它始终属于爱因斯坦方程式中的几何部分，斥力的来源就是宇宙本身的内在结构：这意味着它就是如此，我们并不知道其原因。这就是为什么它没有给假想的投影留下太多空间。因为我们很难幻想宇宙视界之外的东西。

在我们的认知中，只有一种空想可以在宇宙视界之外冒险，那就是新柏拉图学派的空想。这个空想是令人起敬的、复杂的、思辨的，它塑造了自己的概念来驯服无限的扩张力量，并像爱因斯坦为永恒宇宙设定极限一样。然而，它像新的起点一样适应着我们追寻暗能量的宇宙学遐想，因为随它而来的是关于“流射”的记述。在歪曲某些规律的情况下，流射可以提供一种想象的叙述，这个叙述能够紧跟宇宙学的发展，或者回归到宇宙学。但是你必须知道：将新柏拉图学派提升到第一个原理是很困难的，并且关于流射的叙述与科学模式一样抽象。

普罗提诺（205—270）、普罗克洛（412—485）和达马修斯（460—537）等人创立了新柏拉图学派的“空想”。这些哲学家是这样进行思考的：要解释某一个事物，即解释为什么事情是这样的，必须找到其中的原理。但是我们只能在更高的现实等级中找到这个原理。这种自下而上的方法创造了“实体”的等级制度，这些实体都是更低等级的现实的原理。在普通语言中，动词“实体化”是将一个动作名词化（例如，当我们说“喝的和吃的”[25]），但是在哲学语言中它具有贬义的意味，特别是自从康德强调“仅仅因为从逻辑上需要某个事物来证明另一个事物的存在，就假定这个事物是存在的”，这样的实体化是不合理的。

康德认为，每当我们将假设的必要性转向对实体的确定性时都会发生误解。例如，当一些天体物理学家把暗能量看作是观察到的现实时，它就被实体化了，而事实上它只是一个解释扩张加速的假说。

如果现在实体的概念会引发认识论的一些怀疑，那么古老的新柏拉图学派的形而上学毫无保留地表现出它对逻辑和目的论的信赖，而目的论就是为了解释一个事物的存在而假定另一个事物的存在。因此，为了解释自然生物的形式，就要假设它们拥有“灵魂”，一个赋予它们生命的本源。再比如，星体运动的圆形轨迹服从于与它们静止的代蒙[26]相符合的愿望（因为圆周运动是最接近静止的运动）。心灵，也就是所有灵魂构成的整体，是我们在上升过程中发现的第一个实体。并且在所有的灵魂中，最高级和最重要的当然是“世界魂”，它可以调节整个宇宙的呼吸节奏。然而，如果没有更高级的、永恒的并且完全清晰可知的实体来确保时间变化中它们身份的统一，人们就不会理解灵魂在时间和空间中

如何起作用。第二个实体是超越了时间和空间的上帝（希腊语中称为逻各斯），它将所有心智的存在汇集在一起，而这些存在中最重要的不是神，而是数字。其中最基础的是“一”，因为它统一了所有数字和所有其他的存在（从专业性的角度来讲，存在着两个“一”：一个是“统一”，通过不断的求和来产生其他数字；另一个是真正意义上的“第一”，它让所有数字拥有自身的单位数，比如，五个这样的单位数就是一个数字，也就是5）。

看到这里，你是不是觉得有些复杂和抽象，甚至还有些晦涩难懂？普罗提诺的推理并不止于此：所有的存在构成了上帝的实体，但是上帝又是如何保持他的统一性呢？当然不是通过我们刚提到的“一”，因为它只是一种本质。即使它是所有数字中最重要的[27]，它也无法从上帝那里独立出来以适用于一切。在新柏拉图学派的思想中，存在一种尊重，这种尊重针对的是逻辑的严谨性、定义以及避免集合理论内部发生矛盾问题的层级区别：“一”不可能成为它所在集合的统一原则，就像数学中没有“所有集合的集合”一样。存在之所以不能构成它的统一性，是因为在存在之前有一个非常重要的实体，这个实体是所有存在的来源，也是所有存在统一性的原因。通过这个基础原则，我们甚至不能说它是（或者不是），因为这会误解它的属性，并且把它描述为一个存在。普罗提诺将最高级的实体称为“太一”，因为它赋予了上帝统一性，并且它身上不存在任何存在或灵魂多样性的痕迹。

至此，上升的过程完成了，关于流射的故事就可以开始了：“太一”流射出上帝。然后（但是这里并不是按照时间的顺序来排列，因为此时时间还不存在），上帝有着内部的“行列”，创造出连续的数字，然后创造出所有的存在，直到他产生了关于灵魂的想法并让灵魂充分流露，于是他创造出一个时间中的现实：心灵。心灵是所有灵魂的整体，在时间和空间中赋予自然以生命，而自然则赋予物质以生命，但心灵本身不再是任何事物的起源。因此，围绕着我们的物质的东西，是最后的、最低的现实，而这些现实再向下，会碰到最低的底限，也就是“第一物质”，它是一种没有任何特性的无形物质，因为它只是所有形式的消极容器，除此之外几乎什么都不是。

关于流射的故事具有很强的逻辑严密性，它将造物神的所有独断的干预全部排除在外。“太一”对于任何神灵来说都是最高级的实体：它是所有人类尊奉的神的起源（这些神都只是一种存在）。关于宇宙常数的想象，无论对于神正论还是对于宇宙起源说来讲，都可能是新柏拉图式的。但它可能是一种颠倒的、曲解的新柏拉图主义，黑色的新柏拉图主义……因为黑暗属于无形物质，不属于“太一”，而从隐喻的角度看，“太一”比其他一切感性的事物都要更接近光的无法触及的美。普罗提诺拒绝将一股能够打破宇宙永恒和谐的力量实体化。他可能会坚定地与爱因斯坦站在一起，要建立一个静态的、永恒的美丽宇宙。暗能量的斥力推翻了流散的动力，抛弃了流散的动力，也超越了限制。普罗提诺关于流射的叙述并不能抵挡加速扩张中宇宙常数的翻倒。

然而，新柏拉图学派的形而上学依然有应对的方法。它可以向上追溯到一个可以超越所有限制的起源。在普罗克洛的《神学要旨》中，最高级的实体被称为“无限的力量”（apeiron dynamis）。其中apeiron意味着“无限的”，无限让我们想到了暗能量的扩张力量。但是让我们困惑的是，普罗克洛还将apeiron dynamis称为“第一物质”，而它没有结构和同一性。因此，力量有两种“无限的”物质：抑或是一种绝对的超力量，可以流散出所有的存在；抑或相反，是一种绝对的消极性，丧失了所有的性质。这个体系被挤压在来自上方的无限力量与来自下方的无限力量之间。当然，宇宙的永恒不受质疑，但是在这种极性中，我们难道找不到一个和暗能量相匹配的形象吗？在当今的宇宙学中，我们的研究从一个无限的力量到另一个无限的力量，从“大爆炸”到化为灰烬的宇宙。暗能量的形象是颠倒的流散，变为退化。

如果我们有了这样的想法，恐怕就停不下来了。因为无限力量的巨大差异不是新柏拉图主义中最后的黑暗形象。达马修斯达到了提问的最高形式，只有他敢于提出这个问题：“起源的起源是什么？”他将逻辑推理推向了极限，甚至可能超过了极限，换来的是巨大的难解之谜。用米歇尔·德菲斯（1070—1140）的话说，它“像墨一样黑”。事实上，达马修斯仍在理性的范围内做推理，他创造了如纯酒精一般绝对的、令人晕眩的形而上学，也就是黑色的形而上学。

他断言，宇宙，作为事物的“一切”，一定是有起源的，而这个起源不属于“一切”。那么，它是什么呢？这很难说，因为我们能够想到的都一定是属于“一切”的某种东西。但至少，我们可以说它不是什么（这里是否定的本体论的修辞）：这个起源不是自然，不是心灵，不是上帝，因为它们都是“一切”的一部分。它也不是“一切”本身，因为显然我们无法是自己的起源。它甚至不是普罗提诺眼中的“太一”，虽然 “太一”由于其单一性，是最接近的。它之所以不是“太一”，是因为“太一”与它所赋予统一性的东西不同，所以它的定义是通过它与“一切”的关系来确定的。甚至普罗克洛的无限力量也是通过它与自身之外的东西，也就是极限，来确定的。而我们要找的是一个绝对的起源。

必须承认，所有这些否定与绝对起源的本质都没有关系。达马修斯认为这样很好。因为归根结底，当我们对绝对的追寻行将结束时，在我们眼前的一定是无法形容并且不可知的事物。我们要接受的是，思想会消失，会堕入深渊，会陷入“乌有”。“太一”是一个美丽的、简单的、纯化了的概念，但是真正的绝对必须摆脱所有的感知，即使是最崇高的思辨。然而，除了虚无，还有什么能摆脱所有的思想呢？有两种形式的“乌有”：一种是高于“太一”的“乌有”，另一种是低于物质的“乌有”。达马修斯延续了普罗克洛的解决方法：虚无比无限更使形而上学无所适从。人们也能感到，他的话语近乎黑暗中和沉默中的神秘的崩溃。仿佛这最后一位新柏拉图主义者，冒着极大的风险，使用最后的自卫手段，完成了他关于千年的形而上学的最后探索，之后这个空想就会回归沉默，被名为“自我的起因”的造物神的宗教而摧毁——柏拉图学园屈服于庸俗宗教的迫害，这些宗教几乎不受逻辑限制或严密思辨的约束。这可能是我们

应该从中吸取的教训：过度地寻找绝对的形象，我们可能会通向虚无，而错过了一种并非难以捉摸的思想和知识。

不必失望：并非一切都是黑色的！

在电影《穷途末路》中，珍·茜宝问让-保罗·贝尔蒙多：“在悲伤和虚无之间，我选择悲伤（此处引用自威廉·福克纳的《野棕榈》），你呢，你会怎么选？”这个问题象征着想象精神分析师在面对暗能量之谜时的困境：他要么开始对难以捉摸的怪物进行绝望的追寻，要么继续寻找难以接近的起源直到虚无。在这部黑白电影中，男主人公选择了虚无，因为在他看来，悲伤似乎是愚蠢的妥协（这也预示了他悲惨的、“可憎的”结局）。

我们难道不能摆脱这个困境吗？我们难道不能摆脱黑色形象的束缚吗？在这个抉择中存在着某种过于阴暗的东西，我们会毫不迟疑地接受它。此外，一些天文学家和天文物理学家发现了第三种途径：如果我们放弃宇宙中物质均匀分布的假设，那么我们可以用透镜效应，即光学意义上的“像差”来解释膨胀的加速。法国物理学家洛朗·诺塔尔（1952—　）提出的相对论理论不必假设暗能量的存在就可以解决这个谜题。于是，我们不再需要寻找罪魁祸首了。宇宙找回了一点自己的色彩。诗人雅克·利达（1929—　）在他的一首美妙的科学诗歌的末尾写道：

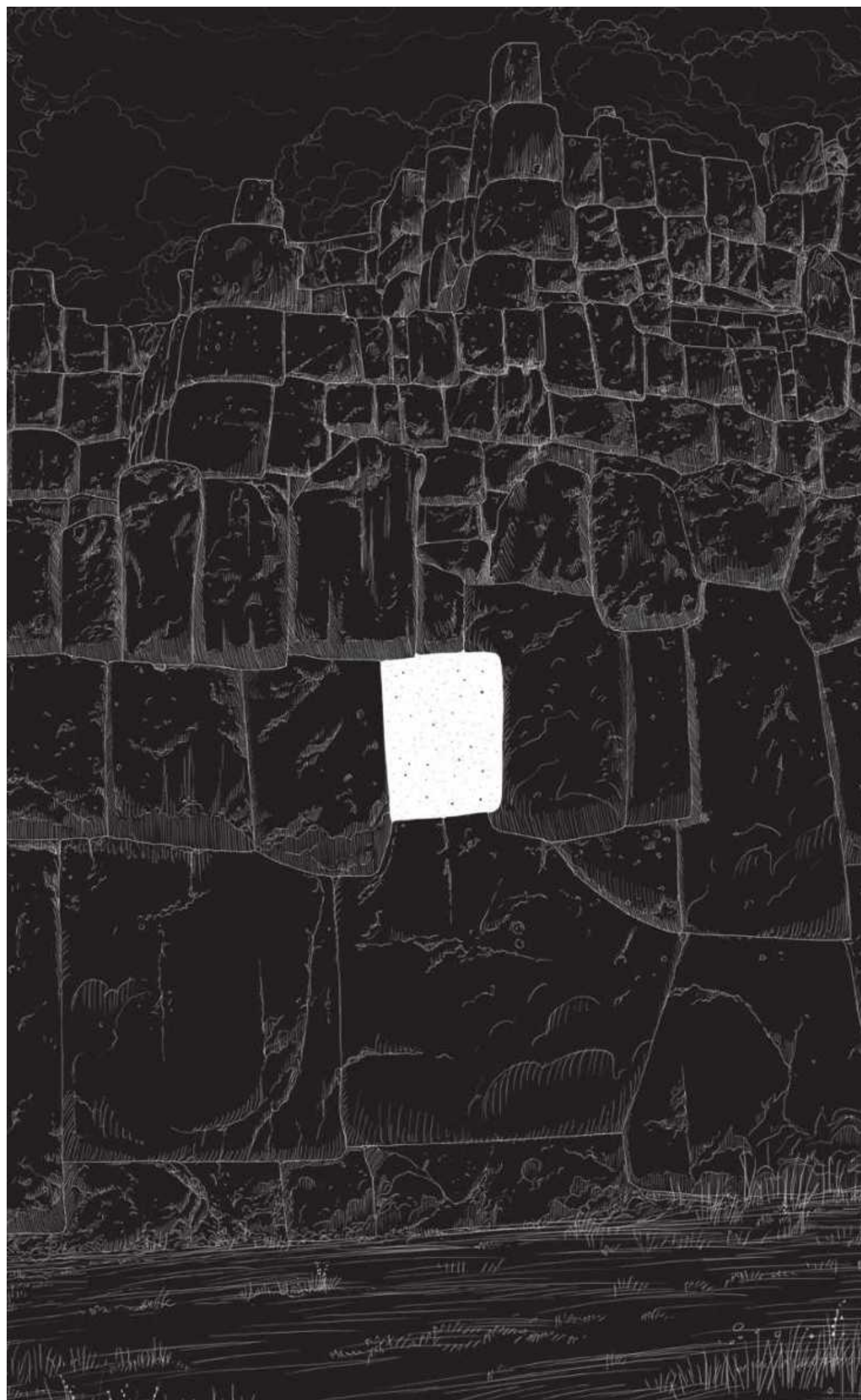
然后呢？宇宙逃亡了吗？

它在躲什么？会逃去哪里？

怎样的永恒的祸患？怎样的胜利的结果？

坚定地说，它就在这儿，法则以外。

暗能量，应该被染成粉色。






结语　黑色的统治

在我们对黑概念研究的最后，我们学到了什么？首先，好像这个对话让这些论说更加清楚明白。哲学家的关注点在于形而上的，甚至是陈旧的顾虑，或者在于艺术和思想史中出现的一些细微差异，并提醒物理学家在翻译概念时对于词汇的选用要格外谨慎，同时纠正那些有悖严格推理的含糊表达，或者要求我们更加勇敢、更有诗意地了解科学思想的独特之处。哲学家将关于起因的认知编制为隐喻，物理学家觉得哲学家的建议非常有必要。

我们惊讶于概念和图像之间的各种回响，它们的衔接中没有绝对的规则。将它们写在一起，我们发现了一种距离的艺术。只有这个既凭直觉的又能精确计算差距的研究才能使科学与想象之间的类比产生共鸣以及不协调。这个差距是可变的：认识论的线和“精神分析”的线很少是平行的，它们更像是欧几里得的短程线；它们会在接近自己的目标时发生扭曲；通常情况下，它们会伸展、延伸；有时它们交织在共同的惊叹中，或是讽刺般地出现分歧。然而，这些纵横交错并不是任意的。这个对话开启了一种写作，在我们看来，这种写作超出了普通的模式练习。

黑色的渐变表现出一种渐进，这种渐进具有一个意义：从我们所熟悉的夜空的黑色到最神秘的黑色，能够解释宇宙膨胀加速的未知能量的黑色，对黑概念的回顾是一段历史性的旅程。这个回顾告诉我们关于给它命名的科学实践的演变（我们也可以说是关于给它“定性”，因为它是一个形容词）。与我们有时所听到的相反，科学语言独立于普通语言之外，是建立在惯例的基础上的，这一事实并不意味着这些概念是中立的，或是对于理解这些概念来说是微不足道的。相反，对这些词语的选择非常重要，是科学工作不可或缺的部分。同样明显的是，这些关于命名的实践在科学史中发生了相当大的变化，特别是近几十年来的加速发展。与此同时，关于它们的不可改变性也出现了深刻的改变。

对夜空的黑色的解释是一个可能早就引起古代天文学家猜测的问题。在过去的几个世纪中，这个谜题的答案随着知识和技术进步的节奏发生了变化。“黑色夜空的问题”这个短语本身是比较近期才出现的，这个叫法已经失去了神秘的色彩。然而，在日常观察的显而易见以及对普通语言的借用背后隐藏着一个棘手的问题，以及对一个透明黑色的单一定义。这是关于意义缓慢的历史积淀的例子。

“黑体”这个短语经历的情况则不同，它体现了一个完全不同的时间性。1860年，古斯塔夫·基尔霍夫在有了关于“黑体”的认知的同时就创造了这个短语。他用一种类比的手法将研究对象命名为“黑体”：一个完全是黑色的物体是一个理想的吸收体（因此也是理想的发射体）。于是它

从根本上改变了这个形容词的意义，来满足科学语言的精确性要求。这个黑色的产生是瞬间的，并与它表明的理论模式紧密联系在一起。因此，它也与它提出的问题相联系，并且在不到半个世纪的时间里，就引起了一场科学革命，也就是量子力学，一场近年来为大众所熟知的思想认知的巨大震荡。通过研究它与当代艺术带来的冲击之间的共鸣，我们想要强调指出这场发生在20世纪的思想变化的突然加速。

“黑洞”这个词的出现和传播标志着一个命名实践的变化、一个创新。这个概念的由来相对比较古老，很长一段时间以来，人们关注的只是封闭的恒星，后来是“史瓦西天体”。事实上，它甚至只在科学界的很小的范围内引起过讨论。尽管这个封闭的星体拥有着古老的魅力，但它并没有引起大众的兴趣。“黑洞”这个词，很难确定是谁第一个使用它的。但是在1967年，约翰·惠勒选择用它来重新命名这个之前就存在的思想，他刻意进行了一个秘密的营销操作：一种语义设计。他创造了一种旨在强调一个概念的表达方式，他从概念的理论意义出发，同时利用了虚构的突出性。这个方法获得了奇迹般的成功：他的同事们将注意力集中在了黑洞上，科幻小说中出现了黑洞的主题，日常语言和普通文化也出现黑洞的渗透。

由于20世纪下半叶科学研究成为一个竞争激烈的领域，这种有效的语言设计的方法成为一种战略的必要性：只有一个巨大的发现是不够的，还要给这个发现取一个引人关注的名字，来保证它在研究领域，甚至研究领域之外的影响。从这个角度来看，我们必须分析著名的暗物质和暗能量的出现。

通过这些著名的概念，我们在命名方法的演变中闯过了一个难关：我们要做的不再是尽快地利用一个发现，而是提前利用一个假设所带来的收益，即未来发现的成功前景。因此这个表达有助于为学界带来一个并不一定被所有人接受的想法：一些科学家将这些与黑有关的概念描述成现实，它们的黑只是意味着这些物质无法被观察到而已；而另一些科学家将这些概念看作思考的气泡，在面对它们时始终保持谨慎的态度。记者肖恩·卡里尼基曾说：“在科学世界中有一种有趣的用法，当你无法解释或描述某个东西时，在常用的单词之前加‘黑’或‘暗’，就成为一种完全正确的表达。”（《技术解密》，2012年6月20日）下面这幅漫画揭示了目前研究中过度的竞争所造成的问题：它会导致对命名仓促的、具有欺骗性的一种使用，而不是对概念的含义做耐心而忠实的解释。



图10.比尔·沃特森，《永远的卡尔文和霍布斯，第四册，1992—1995》，安

德鲁斯·麦克米尔出版社，2012年，49页（第二条）。

我们可以举出关于这种偏差的其他例子，只限于关于黑概念的例子：形容词“黑色的”特别适合这些炫耀语义设计的做法，这可能体现了社会的一种需求。过去，黑色并不像现在这般有吸引力，即便它指的是想象中的一个迷人的元素，它在过去总带着一些与不良思想相关的联想。在文化中，黑色曾是被谴责的对象。而在现代，黑色成为主宰，黑色被高估，被过度使用，这尤其表现在服装设计中：“设计当中的黑色既不是几个世纪前的王族的豪华的黑色，也不是大工业城市里肮脏的悲惨的黑色，它是一种既朴素又精致，既高雅又实用，既欢乐又明亮的黑色，总之它是一种现代黑色。黑色是时髦的、有创造性的、严肃的，并且具有主导地位的。”（巴斯图罗，《黑色》，189页）黑色既象征着美丽与高雅，又象征着端正和朴素。

我们要强调关于术语“暗物质”和“暗能量”的一个更令人不安的事实：在法语中，这两个术语并不存在。在英语——这个在科学讨论中占据主要地位的语言里，形容词“黑色的”（black）并不适用于这些概念：盎格鲁-撒克逊人更愿意研究的是“昏暗的物质”（dark matter）和“昏暗的能量”（dark energy），德语也是如此：dunkle materie，dunkle energie。对于一位意大利研究者来说，他研究的是“模糊的物质”（materia oscura）和“模糊的能量”（energia oscura）。因此法语的语言特殊性显而易见：法语是唯一将这些概念“黑化”的。为了完全正确地表达，这些术语有时与“昏暗的物质”和“昏暗的能量”共存。因此我们有时通过“昏暗的物质”这种表达来描述那种难以被探测但被猜想为传统属性的物质，“暗物质”这个表达则用于描述完全外来的物质。然而，基本上还是与“黑暗”有关的术语在很大程度上占据着主导地位，似乎坚持使用包含“昏暗的”术语的研究人员正是对这些概念持怀疑态度的那部分人。

这增加了我们思考在科学语言中黑色所传达的想象内涵的兴趣。黑概念的吸引力并不是某种偶然，而是这些思想会将黑色形象激发出来。将一个思想概念界定为“昏暗的”或“模糊的”，是为了明确指出探测的困难，同时也强调了我们为描绘这种现象特征所面对的理论尴尬。从这个意义上讲，加上“dark”这个形容词的确可以使这些思想更准确，因为这个形容词会让我们提高警惕。在莎士比亚的语言中，或者在我们的语言中，某种昏暗的东西，从喻义上讲，就是难以理解的东西，甚至是灾难性的东西（一个黑暗的故事）。由于这层含义，暗物质或暗能量似乎是一些有风险的不太明显的假设，我们无法对此表示毫无困惑或者怀疑的赞同。通过将“dark”翻译为“黑”，讲法语的研究人员已经深刻地改变了这个名称的含义。他们把它变得更极端，并利用了法语中“黑色”这个词的象征意义。

黑的，就绝对是昏暗的，是无法探测的。通过把昏暗变成黑暗的绝对化，新的命名排除了一切与昏暗的图像相关的内涵，也就是说，它隐藏在面对这些思想时势必会产生的疑虑的迹象。物质的黑暗和暗能量的

黑暗象征着一切被果断隐藏的事物，自相矛盾的是，这个黑色没有质疑这些假设，而是让我们更坚信它们的存在。在我们的想象中，黑色的存在比昏暗的存在更多。“实体化”创造了暗物质和暗能量，通过这种方式，缺失的质量和宇宙常数成为不容置疑的物质现实。于是科学家们给自己的思想套上了黑色的衣服，他们冒着一个风险，即他们可能会成功，也可能让黑色具有了另一种传统的价值，那便是丧服：“我们这个时代的人们穿的黑衣服是一个可怕的象征……人类的理性推翻了所有幻想，也给自己穿上了丧服。”（阿尔弗雷德·德·缪塞，《世纪之子的忏悔》，1836年）

无论科学的进步给这些问题以怎样的回答，我们都相信历史认识论和精神分析理论提出的两个观点是相关的、互补的。它们让我们可以在面对复杂而棘手、困难而尖锐的问题时向后退一步，这些问题也总会牵扯到推理的严密性和不可避免的感性投入。将我们吸引到黑概念当中的，以及让这些黑概念弥足珍贵的，是代数和实验结构以及潜在丰富的想象符号所表征的错综复杂，正是这种错综复杂让它们如此富有魅力。因此我们需要更多的努力，使它们远离障碍，开展一个调整研究工作，并用一种批判和善意的眼光来看待它们。





[1] 亨利·米修（Henri Michaux，1899—1984），法国诗人、画家。其诗歌直接呈现个体的潜意识与神话原型，语言不再是表达或修饰的工具，而成为映射另一种维度存在的镜子。——译注（如无特殊标注，文中注释皆为译注。）

[2] 安德烈·弗朗坎（André Franquin，1924—1997），比利时著名漫画家。其代表作《黑思想》是一部黑色幽默连环画集。书中探究了抑郁和恐怖的幻想，并且图都是用黑白两色所画。

[3] 加斯东·巴什拉（Gaston Bachelard，1884—1962），法国哲学家、科学家、诗人，代表作《梦想的诗学》《火的精神分析》《科学精神的形成》等。

[4] 勒内·巴雅维尔（René Barjavel，1911—1985），也译作赫内·巴赫札维勒。法国作家、记者、评论家，是首位提出时间旅行中祖父悖论的科幻作家。代表作有《冰人》《不小心的旅行者》等。

[5] 皮埃尔·勒韦迪（Pierre Reverdy，1889—1960），法国著名诗人、超现实主义诗歌的先驱之一。代表作有《椭圆形天窗》《屋顶上的石板》等。

[6] “险恶用心”法语译文为noirs desseins，直译为黑色的企图。

[7] 阿瑟·兰波（Jean Nicolas Arthur Rimbaud，1854—1891），19世纪法国著名诗人。早期象征主义诗歌的代表之一，开启了超现实主义诗歌流派。

[8] 布莱兹·帕斯卡（Blaise Pascal，1623—1662），法国数学家、物理学家、宗教哲学家。

[9] 埃拉托斯特尼（Eratosthenes，公元前276—前194），古希腊数学家、地理学家、历史学家、诗人、天文学家。他是最早有文字记载的计算出地球周长的人。

[10] 菲利普·葛洛克（Philippe Geluck，1954— ），比利时漫画家，代表作《猫》。

[11] 滚石乐队，一支来自英国的摇滚乐队，成立于1962年，自成立以来一直延续着传统蓝调摇滚的路线。

[12] 阿那克萨哥拉（Anaxagoras，公元前500—前428），古希腊哲学家，原子唯物论的思想先驱。

[13] 皮埃尔·苏拉日（Pierre Soulages，1919— ），法国当代知名艺术家，作品善用黑色。

[14] 保罗·瓦勒里（Paul Valéry，1871—1945），法国诗人、散文家和哲学家。

[15] 米歇尔·卡斯（Michel Cassé，1943— ），法国天体物理学家、作家和诗人。主攻核合成和量子力学。

[16] 法语为“ergosphère”，这个词来自希腊语的“ergos”，意为工作。

[17] 夏尔·波德莱尔（Charles Baudelaire，1821—1867），法国19世纪最著名的现代派诗人，象征派诗歌先驱，代表作《恶之花》。

[18] 卡尔·古斯塔夫·荣格（Carl Gustav Jung ，1875—1961），瑞士心理学家，分析心理学的创始人。

[19] 让·季奥诺（Jean Giono，1895—1970），法国作家，代表作《屋顶上的轻骑兵》《种树的男人》。

[20] Anima，也称女性意象，指男人潜意识中的女性性格，只有一个。

[21] Animus，也称男性意象，指女人潜意识中的男性性格，可有多个。

[22] 约瑟夫·布罗茨基（Joseph Brodsky，1940—1996），俄裔美国诗人、散文家，诺贝尔文学奖获得者。代表作有《韵文与诗》《山丘》《诗集》。

[23] 威廉·詹姆斯（William James，1842—1910），美国心理学之父，美国本土第一位哲学家和心理学家。代表作《心理学原理》。

[24] 法语为franchir le Rubicon，卢比孔河位于意大利北部。公元前49年恺撒曾越过此河，同罗马执政官庞培决战。因此这里的意思是绝对采取果敢的行动，破釜沉舟。

[25] 法语中在表示喝和吃的动词boire和manger之前加上定冠词le，就将这两个动词名词化了。

[26] 希腊语daimon，在古希腊神话中它是一种介于神与人之间的精灵或妖魔。它们不具备人的外貌，而是一种善恶并存的超自然存在。

[27] 原文中使用的是拉丁片语primus inter pares，字面意思为“同僚中的首席”。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的

泛阅读服务



专属社群 独家福利

精品共读 活动特权

手机扫码

加入未读 Club 会员计划

未讀

18个未来进行时

WHAT'S NEXT?

Jim Al-Khalili

×

可预见的未来与可选择的现在

[英] 吉姆·阿尔-哈里里 编

陆慕隐 石头 周书云 译

Jim Al-Khalili
Philip Ball
Jeff Hardy
John Miles
Adam Kucharski
Anna Ploszajski
Lewis Dartnell
Naomi Climer
Aarathi Prasad
Gaia Vince
Mark Walker
Louisa Preston
Noel Sh
Dame Juli

科幻小说里的
奇迹
也许明天就会
成为现实

英国科学协会主席、首届霍金科学传播奖得主、
迈克尔·法拉第奖得主 吉姆·阿尔-哈里里

会聚 18 位关键领域的一线科学家
汇集 18 篇基于真实科研的未来畅想

多角度精彩呈现人类全景式未来

量子计算/ 人工智能/ 星际移民/ 能源材料/ 人体改造/……

版权信息

18个未来进行时

What's Next?

作者：[英] 吉姆·阿尔-哈里里（Jim Al-Khalili）

译者：陆素隐 石头 周书云

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

Selection, introduction and Chapter 18 (‘Teleportation and Time Travel’) copyright © Jim Al-Khalili 2017

Other chapters copyright of the author in each case © Philip Ball, Margaret A. Boden, Naomi Climer, Lewis Dartnell, Jeff Hardy, Winfried K. Hensinger, Adam Kucharski, John Miles, Anna Ploszajski, Aarathi Prasad, Louisa Preston, Adam Rutherford, Noel Sharkey, Julia Slingo, Gaia Vince, Mark Walker, Alan Woodward 2017

Simplified Chinese translation copyright © 2019 by United Sky (Beijing) New Media Co., Ltd. All rights reserved

目录

引言
第一部分　地球的未来
人口问题
人口增长与资源短缺
未来的我们
身份识别技术
制度与信仰
从长远来看……
生物圈保护
气候变化
沿革
已知和未知
2050年的气候
我们的选择
小结
第二部分　我们的未来
未来医疗
下一次流行病暴发
定制医学
进一步互联互通的世界
基因组和遗传工程
基因组检测
基因组应用
遗传学、计算机信息处理技术和生物黑客
合成生物学
超人类主义
人类可以更幸福
人类可以更高尚
人类可以更长寿
人类可以更聪明
超人类主义的用意
反对者的论点
文化考量
第三部分　网络的未来
云计算与物联网
网络安全
人工智能
量子计算
第四部分　制造的未来
智能材料
未来自行车

未来飞行器
智能材料的遗留问题
能源与未来
能源和温室气体
科技爆发
无处不在的数据
世代联系
智能生活
全球视野
小结
未来交通
成本、时间、载量与便利性
环境影响
公共交通与智能出行
自动驾驶汽车
机器人技术
自动驾驶
家用机器人
看护机器人
武装和治安防护机器人
偷走就业岗位的机器人
为气候变化修复问题的机器人
人类与机器人的未来
第五部分　遥远的未来
星际旅行与太阳系开发
推进器的选择
家外之家
人体的脆弱
地外前哨站
月球
火星
金星和冰卫星
小结
末世图景
全球性灾难的风险
气候变化
小行星和彗星撞击
超级火山
日冕物质抛射
全球流行病
文明的备份“存档”
空间传送与时间旅行
空间传送
时间旅行

作者简介
延伸阅读
返回总目录

引 言

文/吉姆·阿尔-哈里里（Jim Al-Khalili）

按照爱因斯坦相对论的说法，未来就在那里等着我们——所有的时代，过去、现在和未来，在静态的四维时空中早已存在并永恒不变。我们的意识沉浸于变幻莫测的现在，沿着时间轴爬行，迎接未来，将它一口吞下，让它成为过去，留在我们前行的足迹中。然而，我们永远无法看清前方。尽管心理学家和预言家提出过很多说法，但我们无法预测未来却是一个无可争辩的事实。

在形而上学的层面，我们的未来是注定的还是开放的，我们的命运是被封存在一个确定性的宇宙中，还是可以被我们自由塑造，这些仍然是科学家和哲学家正在争论的问题。当然，有时候我们可以按理确信会发生什么——事实上，将来的某些事是必然的：太阳将继续照耀（至少几十亿年），地球将继续绕着地轴旋转，我们都会变老，而我喜欢的利兹联队总会在足球赛季结束时让我失望。

但在其他方面，未来能以完全意想不到的方式呈现。人类文化是如此丰富多彩，以至于事物经常以人们无法预测的方式发展。因此，虽然有一些人能够预言唐纳德·特朗普（Donald Trump）在2016年当选美国总统，但是（到目前为止）没有人能够准确预测下一次自然灾害（地震或洪水）会在何时何地发生。

关于科技进步如何改变未来生活的预言四处流传，有的毫无悬念，有的不可思议。最可靠却也最富有想象力的未来预言往往来自科幻作家，但1990年之前，又有多少科幻作家描绘出了今天互联网连接一切的世界？仔细想想，万维网听起来仍然很梦幻。

那么，在21世纪的第二个十年，我们该如何编写一本关于未来科学发展的书呢？这些技术是即将到来，会在五年或十年之后与我们见面，还是出现在远超我们有生之年的遥远未来？

本书中的一些文章发出了严肃的警告，无论是本来如此还是缘于人类的活动，如果我们现在不采取行动，一些问题可能会让我们的环境变得非常恶劣。解决全球问题的关键涉及金融、地缘政治和文化，以及科学和工程。显然，用好我们对自然世界的认识，以及新科学在技术中的创新性和创造力，这在未来的几十年里将变得比以往任何时候都更加重要。这些文章也是希望的明灯，因为它们向我们展示了科学如何应对最糟糕的情况，例如气候变化带来的破坏性影响，以及人口过剩或微生物抗性招致的疾病流行。

不可否认，新技术的实际应用都必须经过仔细的思考和论证，仅以几个令人振奋的飞速进展的领域为例，无论是人工智能、机器人技术、遗传学、地球工程，还是纳米技术，都是如此。我们不能不仔细研究新发现及其应用带来的伦理影响和实际影响，而轻率地任由自己被推向不明的未来。我想到很多例子：机器人正开始在工作场所取代人类，人们要防范网络恐怖主义，还有，随着世界人口规模和人类野心的增长，自然栖息地遭到摧毁，生态系统遭到威胁，自然资源即将耗尽。当然，我描绘的是一幅凄凉黯淡的画面，而我们的未来未必如此。

记住一点非常重要，那就是：科学知识本身既不善良也不邪恶，重要的是我们使用它的方式。可以肯定的是，在十年或二十年内，我们将拥有人工智能控制的智能城市、无人驾驶汽车、增强现实、转基因食品、更有效的新能源、智能材料，以及全部联网并交换信息的无数小工具和电器。这将是一个今天的人几乎无法辨认的世界，正如今天的世界在20世纪70年代和80年代的人眼中一样。毫无疑问，我们对世界的了解和这部分知识的运用将继续大幅改造我们的生活。

本书中的一些文章描绘了比较可靠的未来图景。这是因为其中描述的科学技术已经以雏形进入我们的生活，我们可以清楚地看到这部分科学技术在未来几年如何趋于成熟。其他的文章提出了某些技术在未来的多种可能，这不是因为我们不了解这些科学内容，也不是因为科学的应用可能带来意外，而是因为我们选择的道路取决于科学知识的使用方式。可靠的政治家和有科学素养的民众需要共同做出这些关乎社会未来的决定。

某些主题，包括无人驾驶汽车、遗传工程和所谓的物联网，被多位作者提到。我在选择稿件时有意为之，因为这可以为读者提供未来几十年人们生活变化的多个视角。这样还能凸显许多新技术之间如何相互关联，彼此促进。

还有一些文章，特别是那些被安排在本书末尾的文章，不可避免地更具推测性。例如，在本书最后我自己的作品中，我展望了现代人无法到达的极远的未来。但这又如何？有关科学未来的好书怎么能对瞬间移动和时间旅行只字不提呢？

公平地说，安排在前面的文章在描绘未来时采用了相当忧郁的笔调，如果得不到重视，现在的警告会成为未来的灾难。其他文章则为必将在不远的将来丰富我们生活的奇妙技术而欢呼。然而，从一开始就需要说明的重点是，这一系列文章既不是盲目乐观也不是危言耸听。这本书旨在尽可能坦率和客观地描绘出一幅未来的画面，这也是全世界相关领域前沿专家所看到的未来。所有文章的共同点是：它们都基于我们目前对自然规律（科学事实，而不是科幻）的认识。它们要预言的不是充满想象的、牵强附会的未来，本书无关魔法和幻想。在我看来，这些对未来做出理智预估的文章，这些有着可靠知识根基的文章，可以为读者带来更加真实而动人的未来之旅。

第一部分　地球的未来

THE FUTURE OF OUR PLANET

人口问题/生物圈保护/气候变化

人口问题

DEMOGRAPHICS[1]

文/菲利普·鲍尔（Philip Ball）

世界因我们改变而改变——像大多数经常被忽视的事实一样，这件事一说出来就很明显了。未来将变得和现在不同，这不仅仅因为我们将发明新技术，还因为我们选择发明某些技术并加以应用——因此，我们允许这些技术改变我们自己。有些技术无疑会解决长期存在的问题，并造成一些新问题；有些几乎不会触及未来的重要挑战。无论如何，仅仅将如今的我们置于推测出来的自然环境和人工环境中并不能真的让我们看到未来。那么，在未来，我们将如何拥有不同的生活？我们的生活将有多大的不同？

人口增长与资源短缺

如今，变革的最大驱动力是人口增长，而人口又可能因技术变革而增长。如果没有19世纪以来的农业和粮食生产业革新，特别是20世纪中期几十年间将高产作物品种培育与人工肥料的效用结合在一起的绿色革命（Green Revolution），我们可能无法供养这个星球上的75亿人口。如果没有科技进步，可能有数十亿人被饿死。

但是，如果没有进一步实质性的创新（特别是在粮食增收、食品生产和水资源利用方面），那么到了2050年，我们无法保证自己能够供养地球上超过90亿的人口。人口增长的主要地区将是非洲和亚洲，尤其是经济和基础设施方面都不占优势，难以应对这一情况的国家。

没人能保证农业生产率随人口增多而提高。气候变化可能加剧土壤侵蚀、荒漠化和生物多样性的丧失，这很可能让世界大部分地区生产率降低，包括因人口增长而需要更多食物的地区。现在，这种变化通过全球化与市场变迁相连：改变一个地方的需求或优先等级（例如种植生物燃料作物）会对其他地方的粮食生产或供应产生重大影响。这意味着，粮食安全仍将是世界未来可持续发展的重要议题。2008年，食品价格飙升已然引起了大范围的社会动荡，并造成了海地政府的垮台；2011年食品价格上涨也和北非“阿拉伯之春”（Arab Spring）事件紧密相关。

水资源同样前景堪忧。目前，有7.5亿人口面临水资源短缺。这个数字到2025年可能增加到30亿，而从美国中西部到中国华北平原的干旱地区，淡水水库已经面临过度使用。

所有这一切可以看作一个悲伤的故事，它关乎灾难、文明崩溃和世界末日的预测。但我们也可以从中总结出未来政治和技术挑战的任务清单。也许，最重要的是，这提醒了人们，在未来什么是最重要的。是的，个性化医疗、智能机器人、小行星采矿和器官再生听起来都非常惊心动魄（或足以令人恐惧，这取决于你的观点），也许这些都会实现。但是，人类由来已久的问题——我们吃什么？喝什么？——无论何时都不会消失。事实上，可能正是这些问题，而不是信息、运输或医学领域的技术创新，最终决定人和人之间、国家和国家之间互动的模式。

因此，我们需要的是可持续发展的架构。可持续这个词用得够频繁的了，但我们的思路并不是总能跟上。一些经济学家对难以控制的人口增长不够关心，他们认为相关警告是危言耸听，并且认定人类的创新和才智会像过去一样继续支撑大局。还有一些人指出，不顾污染等严重问题，听凭市场力量驱动经济无限增长并不具有必要性，而且这种增长并不能长远持续下去。争论的双方都可以整理数据，或至少列举故事，以支持他们的观点，但他们往往忽视了一个已经存在的科学框架——热力学已经对各种选择施加了很大的限制。没有能源消耗和随之产生的损耗，食品的生产、新思想的出现、社会的推陈出新都将不复存在。简而言之，没有免费的午餐。社会是复杂的生态系统，但它与其他任何生态系统一样，都是相互作用的网络，需要能量，对抗熵衰减，具有适应性，但也有一定的脆弱性，易受影响。创建一门真正的可持续发展科学可以说是我们在22世纪最重要的目标；没有它，一切都不值一提。毕竟，我们在宇宙中的存在并非必然。

未来的我们

既然如此，未来的“我们”会是怎样的一群人？

寿命的延长和出生率的下降意味着全球人口的平均年龄正变得越来越大。英国超过75岁的人口数量将从2012年的510万增加到2022年的约660万。到2050年，发展中国家将有1/3的人口超过60岁，其他的暂且不说，单是医疗卫生行业就会面临更大压力，这也将改变就业人口的比例。

我们还有一个必须提出的问题：我们将在哪里栖身？2007年，联合国的一份报告宣布，全球一半以上的人口生活在城市，世界人口在21世纪初期越过了一个重要节点。对于大多数人而言，未来是城市的未来。

现在，人口超过1000万的大城市有许多，其中大多数在亚洲、非洲和南美洲的发展中国家，包括孟买、拉各斯、圣保罗和马尼拉。未来20年，几乎所有的人口增长预测都将以这些地区为基础，特别是发展中国家，到2035年，世界人口的60%左右将生活在城市地区。

在古老的传说中，人们走进广阔的世界寻求财富，而今天，我们在

城市里淘金。许多人从周围的乡村来到城市，希望过上更好的生活，但他们并不一定能找到更好的生活。许多城市无法应对这些涌入的人口。例如，现在有1.5亿城市居民缺水。此外，正如气候变化模型预测的那样，随着海平面上升和极端气候变得更加常见，沿海低洼地区许多快速增长的城市将面临越来越高的洪水风险。

不用水晶球，我们也知道美国的全球影响力会逐渐减弱，欧洲统一事业的上空仍然悬着阴云。但是，如果心怀疑问，那么我们瞥一眼世界各大城市的变化就会知道未来几年哪里可能出现巨变。在1950年，全球最大的五座城市从大到小分别是：纽约、东京、伦敦、大阪和巴黎。2010年，前五名变成了：东京、德里、墨西哥市、上海和圣保罗。2030年，预计该名单将会是：东京、德里、上海、孟买和北京。要找到未来的人口中心，请向东走。

当然，对于一座城市来说，发展是一回事，繁荣则是另一回事，在里约热内卢和圣保罗的贫民窟中，这一点实在是太明显不过了。尽管如此，中国和印度仍将毫无疑问继续向全球超级大国发展。在接下来的20年里，中国可能建造二三百座全新的城市，其中许多城市的人口超过100万。事实上，这个星球每周都会新增一座约150万人口的城市。

但未来的城市会是什么样子呢？艺术家向我们描绘了闪闪发光的玻璃和顶部覆盖着绿色植物的铬合金，这非常迷人，但也有误导性，因为城市的未来不是只有一种可能。未来可能更人性化，更加环保，更有活力，也可能满是四散蔓延的贫民窟，中间点缀着闪闪发光的金融区，贫富差距比今天更加可怕。我们究竟能不能成功规划城市？城市是否如有影响力的城市理论家刘易斯·芒福德（Lewis Mumford）和简·雅各布斯（Jane Jacobs）所说的那样，必须“有机地”扩展，否则难以充满活力、兴旺发达，而会变得冰冷而贫瘠？

一些研究者认为，除非我们开创真正的“城市科学”，而不是依赖于城市规划者和建筑师任意、俗套和政治化的想法，否则我们几乎没有希望回答这些问题。当我们认识到有些原理几乎适用于规模和特色各不相同的所有城市时，我们便看到了这种新兴学科的微光。城市依赖于规模经济：城市规模越大，对基础设施和能源消费方面的人均需求越少，人均收入增长就越多，城市就越有利于创新。但随着规模增长，一切都会变得更快，无论好坏：大城市犯罪、盗窃和传染病的发生率更高，通常生活节奏更快，企业兴衰的速度更快，人们走路的速度也更快。看来，没有城市的缺点就没有城市的优点。所以，如果有幸可以选择，那么我们可以随便选。

向城市移民的趋势是全球范围内更广泛的移民潮的一部分。联合国估计，目前有2亿多人从自己的国家迁移到另一个国家，大约7.4亿人在自己的国家内迁移。在过去的几十年里，大量人口迁移活动涉及从农村和山区迁移到城市。

为什么会有这种迁移活动呢？在低收入国家，大多数人出于经济原因而搬迁，这是为了寻求更好的就业机会、更高的工资或生活多样化，当农业作为一种生活方式变得不可持续时尤其如此。有些人搬迁是为了接受教育，或者与家人团聚。有些人希望摆脱政治或文化迫害、战争和冲突，比如叙利亚移民。有一些人出于社会原因被迫搬迁，比如中国的三峡移民。还有一些人被迫逃离恶劣的环境，包括被洪水淹没的地区、贫瘠的农田，还有缺乏水资源的地区。

气候变化将在未来几年甚至几十年不可避免地使移民增多，但这并不意味着“气候移民”值得一提。环境变化会以复杂的方式与其他促使迁移的因素相互作用。津巴布韦有经济和政治危机，再加上农村干旱，自2000年以来已经导致150万～200万人逃到不愿接纳他们的南非。更重要的是，环境变化引发的迁移可能会模糊政策和法律规定中“移民”和“迁徙”之间的区别，前者被认为是一种选择，后者则是被迫的。有时，我们很难判断一个地方的环境是否已经恶化到了使人被迫搬迁的程度。无论如何，欧洲近些年的经验表明，移民和入境将毫无疑问是未来几年内的重要政治议题。

身份识别技术

这些迅速发生的大部分变化似乎与非洲农村或蒙古游牧民族的生活相距甚远——除了一点。多亏了电话网络，他们和我们连在了一起。

现在，世界上每三个人中就有两个人拥有一部手机（或者至少有一次认购），即使在撒哈拉以南非洲的欠发达国家也是如此。这些设备是我们今天主要的（远程）通信方式。互联网访问尚未显示出相同的扩展态势：在发达国家，4/5的家庭能上网，但在不发达的国家，这一比例远低于1/10。对技术或数字鸿沟的担忧是有道理的，这不是一个能用简单的式子求解的问题。毫不奇怪，这种差异在特定年龄的统计数据中也很明显：在英国，2016年，16～24岁的受访者中，有超过99%的人表示他们在过去3个月中使用过互联网，但75岁以上的受访者中只有39%的人使用过互联网。

访问情况只是一个侧面。移动网络还让用户的使用模式向着永远在线的心态转变。所谓的Z世代（Generation Z）出生于20世纪90年代，从未经历过缺乏这些设施的时代，他们现在都已成年。就在2011年，一项针对16～24岁英国人的调查发现，45%的人在上网时最快乐。现在，许多企业希望员工能够通过手机和电子邮件保持联系，家庭事务和个人事务也可以在办公桌上处理，工作和家庭之间的界限可以被打破。

类似的统计数据有很多，但这些数据的结论并不明显。依照当前趋势直接推测，到下一个十年结束时，世界各国3/4的人口都将拥有移动电话。但肯尼亚农民或蒙古游牧民族使用电话的结果，自然不同于伦敦金融城中的交易员。

信息技术和社交媒体的传播证明了它们确实应该被称为“变革性”和“颠覆性”的技术，但它们将改造和颠覆什么呢？2011年的“阿拉伯之春”本身就是一场“推特革命”——这样的观点令人兴奋，但相关证据已基本化为泡影，无论如何，这一观点并没有告诉我们接下来会发生什么。

世界日益“信息互联”，这只是人们日益相互依存的趋势的一方面，这种趋势影响着贸易、旅行、疾病、审查制度、隐私等许多其他方面，并受到这些方面的影响。换句话说，这是令人头晕的、没有人能够提前体验的未来。以下是迄今为止的一些经验让我们产生的想法：

· 互联互通并不意味着包容。相反，这里可能会产生观点的分裂，使政治论述变得粗俗，并滋生或强化极端主义观点。几乎没有迹象表明互联网或社交媒体鼓励宽容和辩论，在某种程度上，它们的创立是为了使我们与异议或挑战隔绝，个性化新闻推送就是一个例子。在过去，寻找否认大屠杀的伪历史常常需要下点功夫，现在只需要点击一下鼠标即可。

· 信息技术可能会放大现有的偏见和误解，它们也可能放大不平等。在商业、贸易、艺术、娱乐和流量方面，市场越来越倾向于“赢家通吃”。心理学研究表明，这正是我们对评级系统的期望，在评级系统中，我们很容易看到其他人的选择。

· 如果一项工作可以由机器人完成，那它很可能就会由机器人完成。金融业有一个重要部分已经让自动交易算法主导业务了。它比我们快，在我们对一些规律一无所知的时候就能做到心中有数。这种自动化的技术将扩展到更复杂的工作领域，包括医疗卫生和教育领域。当然，这可能是有益的。机器人医生从不睡觉，病人不需要提前数周预约，机器人医生可能比人类医生更了解病人的健康状况，因为它们可以使用植入式监测设备和基因组数据。但是，先进的技术也将改变劳动力市场。一个已然明确的历史教训是，那些对社会生产力而言无足轻重的人将被剥夺经济权利，而不是享受更多闲暇。

· 我们最重要的资产可能不是技能、知识甚至财富，而是声誉，比如，在网络平台收到的评价。这意味着我们需要好好管理自己的声誉，或者请别人帮我们管理，就像企业那样。

这些趋势并没有明确地指向单一的方向，实际上这里存在内部矛盾：谎言更容易暴露，但也更容易传播。最重要的是，社会政治环境会对这些变化产生巨大影响。

尽管如此，我们仍然可以为未来的自己寻找可能的结果。在未来，我们的身份远不如过去那么确定，而且更加多元化，或者至少比我们想象的要复杂得多。我们会拥有对应不同情境的多重身份，它们会互相重叠，趋于模糊，但它们却以不同的方式定义了我们的观点和选择。特别

值得一提的是，定义身份的传统社会范畴（例如年龄、阶级和国籍）正变得不那么重要，就像公开的身份和私人身份之间的区别一样。基于阶级、种族和政治派别的旧身份定义可能会让位于新的身份定义，例如以城市/农村或教育程度高/低等为依据的身份划分。

如果个人身份的传统属性在未来十年变得更加零散，那么社区关系可能会变得不那么紧密。这也许能降低社会流动性，导致特定群体被边缘化，催生种族隔离和极端主义。另一方面，具有超越性的互联也可以积极地产生或加强群体身份认同，为社区建设提供新的机遇。日益紧密联系的人生和身份认同是有益的还是有害的？嗯，兼而有之吧——而且始终如此。

制度与信仰

弗朗西斯·福山（Francis Fukuyama）1992年出版的《历史的终结与最后的人》（*The End of History and the Last of Man*）已成为未来学中最受欢迎的出气筒。现在看看，你会觉得这种观点可笑：柏林墙倒塌、苏联解体后，自由民主制是每个发达国家合乎逻辑的最终形式。然而，现在我们比以往任何时候都有更多的理由怀疑福山温馨的预测。显而易见的是，稳定的民主国家在世界大部分地区仍然像以往一样难以捉摸（当然，它们也不会因独裁政权被推翻而不可思议地出现），同时我们也不能理所当然地认为，一朝民主等于世代民主。在撰写本文时，欧洲和美国的蛊惑人心的民粹主义可能将自由民主国家变成强者政权（Strong Man' regimes），这种政权通过胁迫、腐败和勾结得以维持。“自由”和“民主”是否可以成为永远的搭档？无节制的资本主义，其经济谎言、加剧不平等和仇恨的倾向，是否能够至少与其中之一相符？这是我们正在探讨的严肃话题。

简而言之，西方评论员毕竟已经不再那么肯定他们已经掌握了最好的治理形式，更不用说他们打算如何在其他地方发展它了。

根据政治学家大卫·朗西曼（David Runciman）的说法，民主的优势——从各种冲击中恢复的功能——也是它的致命弱点，因为它缺乏真正从过去汲取教训的动力。胡乱应付似乎是一个足够好的策略，直到应付不过来为止。

似乎可以肯定的一点是，我们应该停止将政治视为在达到静止的、严格的均衡之前要冒会儿泡的某种化学反应。变化似乎是唯一确定的事情，而且，越来越多的政治学家将其称为“不连续”过程，变化不是逐渐发生的，而是由突发的重大事件促成的。

我们可能预料到的变化包括宗教地位的变化。问题与其说在于宗教信仰，不如说在于某一种宗教信仰。四大宗教（伊斯兰教、基督教、佛教和印度教）似乎越来越使得其他宗教黯然失色。全世界有大约16%的

人口公开承认自己是无神论者，在西欧，这个占比更高，但无神论的传播速度却比主流宗教信仰要慢得多（佛教是个例外，其传播速度实际上是成比例下降的）。穆斯林的全球人口占比增长最快，预计到2050年将与基督教（约占全球人口的30%）的相等。

无论这些趋势给了我们什么感受，我们看待它们的方式都应该像研究其他文化特征（如语言）的传播时一样。宗教与这些文化特征一样，与人口增长和经济发展等其他因素不可分割。宗教信仰也将继续深刻地影响人们的生活，无论这种影响是正面的还是负面的。历史清楚地表明，宗教不一定反知识分子、反科学、反民主、反人道主义，但宗教有可能如此。

从长远来看……

最好的科幻小说无关预测未来。这些故事有另一番魅力——想一想《世界大战》（*The War of the Worlds*）、《美丽新世界》（*Brave New World*）、《1984》（*1984*）、《刀锋战士》（*Blade Runner*）[2]，还有1997年关于遗传隔离的电影《千钧一发》（*Gattaca*）吧，在天马行空的想象中，这些故事通过未来世界的自由探索现在的焦虑。因此，当拥有喷气背包、月球基地和机器人服务员的美好未来未能实现时，我们没有理由抱怨。这根本不是重点。

然而，即使是最好的科幻小说也可能会错误地一味想象什么技术会影响我们，而认识不到有多少技术会对我们做出反应。极少有什么技术真的是强加在我们身上的，无论我们的负面感受多么真实。它们到来的原因是，我们的社会接受它们，欢迎它们，并最终使它们常态化，这个过程通常在一定程度上让我们感觉被强迫了。在移动电话和社交媒体出现之前，我们从来没有真正意识到自己有多自恋，有多渴望逃离周遭的现实，并减轻孤独感。曾经，我们并不了解社会可以在多大程度上以陌生人之间的信任为基础去运转（电子商务），不明白我们对不同观点有多厌恶（回声室效应），不知道我们眼中平凡的世界多么迷人（真人秀电视节目），匿名能让我们变得多么令人讨厌（网络暴力）。

因此，未来学可以而且必须促使我们为自己举起一面镜子。想象一下超人类主义的未来：通过将我们的身心与信息技术融合，将我们的思想下载到量子硬盘中，我们可以实现永生。这可能是纯粹的幻想，也可能不是，我认为这是幻想，但幻想有启迪作用。它表明，无论如何，我们与死亡的关系将成为社会变革的驱动力。同样，我建议我们不要将本书中的预测视为未来，而应把这些看作我们对未来的向往。

当我们面对未来，问出“我们将会是谁”时，政府部门往往会发布冷静的报告，充斥其中的路线图和数据多半基于对当下情况的推断。另一方面，未来学家想象着“不连续”变化和“奇点”：现状突然被打破，不可预见的技术或政治危机造成断裂。与此同时，艺术家和作家为想象力插

上翅膀，他们的一部分想象力是狂野的，甚至是耸人听闻的，常常带着讽刺意味。我们也许将生活在《美丽新世界》，成为孵化中心的产品；在某颗满是巨塔的星球毁灭之前，我们也许会在每座塔中安顿一个国家；我们也可能在《世界末日》（*Armageddon*）的废墟中，以蹩脚的乔叟式方言讲述着科技奇迹的传说。我们需要所有这些数字、转换和愿景，不是因为它们能给我们答案，而是因为我们必须设法发现我们为自己设下的陷阱。正如美国作家理查德·鲍尔斯（Richard Powers）所说的：“人们想要一切。这正是他们的问题。”

生物圈保护

CONSERVATION

文/加亚·文斯（Gaia Vince）

哥斯达黎加太平洋海岸的黎明时分，正变成淡红色的天空下，一名男子在水边的深蓝色剪影渐渐地生动了起来。我关掉手电筒。杰罗·奎罗斯·罗萨莱斯（Jairo Quiros Rosales）和我是这片广阔的黑沙滩上仅能看到的人，这里的火山沙向北一直延伸数公里。杰罗在招呼我，我赶快下去，掠过海滩和黑暗的海岸线。随着光线变亮，我辨认出了远处送葬的秃鹫，幽暗中出现了各种各样的杂种狗，在沙滩的夜里嗅着。

接着我就看到了它们：在海滩上面约100米处，像奇怪、匀称地隆起的石头，数百只榄龟正从海洋爬到海滩上产卵。这就是阿里巴达现象[3]，在西班牙语中它的意思是“到达”，为了看到它，我已经等了一个多月。我急切地抓住杰罗的胳膊，催促他快点朝着海龟赶去。他有点惊讶，但还是笑了。虽然我们以前没有见过面，但我们在电话里已经有点熟悉了——或者不如说，我不断打来电话唠叨，询问什么时候会有阿里巴达，这让我喜欢上了这个腼腆的哥斯达黎加研究员。我们说的是西班牙式英语，他的英语比我的西班牙语好，但和大多数对话一样，有些概念在不同的语言中效果最好。阿里巴达就是其中之一。

大多数海龟在一年中的不同时间单独筑巢，以便它们的幼龟在不确定的时间和地点孵化，从而避开捕食者。但是榄龟（以及坎普一带与之密切相关的鳞龟属动物）进化出了一种独特的大规模筑巢策略。它们同时产卵，让许多孵化的幼龟同时出现，捕食者不可能吃掉所有的幼龟，否则会招架不住。这被称为“捕食者困境”。榄龟大量出现的现象每年在全世界的几个地点发生若干次，而哥斯达黎加的奥斯迪欧娜海滩（Ostional beach）就是这些地点之一。

我们沿着光滑的海岸线走进这和谐的一幕中，海龟像坦克一样从海中涌上海滩。激素驱使着这古老爬行动物的母性舰队前来存放珍贵的货物。杰罗指向大海，在那里，有一排与海岸平行的背甲帽，小脑袋不时地探出来进行呼吸，等着轮到它们上岸。在我们前面，海滩开始起伏，海龟背着心形的橄榄色龟壳急急忙忙地爬过。现在可能有数万只海龟聚集在沙滩上。一些完成了生产，正在返回大海的途中，不适合在陆地上行进的鳍状肢笨拙地在怀孕伙伴的潮流中逆行，厚重的龟壳起伏着。它们已经精疲力竭，在岸边等待来袭的海浪将它们卷进海里。

我沉浸在这一奇妙的景象中。“太神奇了。”杰罗望着我的脸，表示赞同。他凌晨两点起床，已经多次见过这样的景象，但他显然也被感动

了。海龟通常隐藏在它们的海底世界中，而我们却囿于陆地。我曾难得地在潜水时近距离看到它们，在那里，它们毫不费力地游动着，优雅得让人意外。近距离看到大量野生动物是很不寻常的，看到这么多，被这么多包围，这令人难以置信。像所有海龟一样，榄龟也因为我们人类而濒临灭绝。

这些有硬壳的活恐龙是目前世界上2.3万种濒临灭绝的物种之一。人类现在如此普遍地支配着这个星球，以至于我们正在将野生动植物驱离地球。我们已经将世界上一半以上的土地用于种植粮食，建立城市，修建道路和采矿；我们耗费了地球40%以上的净初级生产力（这是植物和动物生产的所有东西）；我们控制着3/4的淡水。我们目前是地球上数量最多的大型动物，其次是我们饲养的动物，它们为我们提供食物和服务。我们星球的变化正使1/5的物种面临灭绝的威胁，这大约是自然灭绝速度的1000倍。仅在过去的40年里，我们就已经失去了一半的野生动物，生物学家发出警告，我们正进入地球历史上的第六次物种大灭绝时期。以前的这类事件，包括恐龙灭绝事件，都是巨大的小行星撞击或超级火山爆发等灾难性活动的结果。

自然世界正遭受人类施加的全球性影响，海龟和其他许多物种一样，处境只会变得更糟。我们应该在意吗？失去一群我们很少看到的动物真的很重要吗？人类与自然世界的关系是复杂的。要了解目前的物种灭绝模式，我们需要着眼于人类生活和生计，以及我们的欲望和动机，了解这一切如何卷入复杂的全球环境中。

对我而言，阿里巴达的故事提供了对行星式问题[4]的独特见解，其规模远远超过任何个别参与者。当然，在人类主宰的星球上努力生存的动物或植物情况各不相同，但人的情感和驱动力随处可见。奥斯迪欧娜之所以如此与众不同，是因为当地居民找到了一种既能利用也能保护自然资源的方法。这就是关键：我们无法保护全世界的野生动植物，除非同时保护建立在这一切之上的人类需求。

当我们沿着海滩散步时，杰罗正在给海龟计数，通过龟壳和海龟在沙滩上往返的古怪槽道轨迹，估计在整齐放置的测距杆间的海龟数量。他说，稍后，研究人员将进行更准确的计数，但根据第一次计算，到目前为止，阿里巴达的海龟数量超过了一万只。一些海龟将被标记、测量，并被记录在国际数据库中，以便我们跟踪它们的行动。首先，他想让我看样东西。

“来吧。”他催促着，带我走上海滩，在那里，潮湿平坦的海滩慢慢地变成柔软干燥的沙丘。涨潮线上方是海龟筑巢的地方。一只新来的海龟已经爬到这里，并开始在它选定的位置挖掘。杰罗和我蹲下来观察它。它用鳍状前肢铲起沙子，拂到左右两边，那些沙子一层层地覆在我的双脚上。它不断地挖，掘出了一个更宽更深的坑，继续着从恐龙时代开始的仪式。在由爬行动物统治地球的时代，地球更加温暖，动物体积庞大（例如3米长的白垩纪古巨龟，还有离我们较近的2吨重的骇龟属海

龟），甲壳足以提供保护，让它们免受掠食者侵害。那时地球上还没有人类或任何类似我们的生物。短短几分钟，洞就准备就绪，它轻轻地倒转进去，先将尾巴放下。从这儿开始，它用后肢挖出更深的坑，以一种我只能理解为故意的方式把更多沙子抛到我们身上，因为它在挖洞的时候一直直直地看着我。

当洞最终让它满意时，它就准备产卵了。开始分娩。它的外壳明显用力地起伏着，双眼迟钝地凝视着，似乎进入了恍惚状态。对它身下精心准备的巢穴，它已经做出了判断，温度、深度，还有与海洋的距离都很合适，它一个接一个地产下卵。这是它在进化史上存在的理由，是将它和母亲、祖母，直至古老白垩纪祖先联系起来的遗传物质，这种联系还以某种本质的方式触及了海龟的“表亲”，也就是我（人类）。它的呼吸变得强有力，在它努力产卵的时候，鼻孔里积聚了水分。跨越哺乳动物和爬行动物之间的鸿沟，我对这位母亲深表同情。在我们周围，在这个巨大的产房里，其他母亲正在抛沙或产卵。沙滩上潜伏着秃鹫和狗，它们正等待时机，要挖出新产的卵。

每只海龟大约会产100枚卵，在阿里巴达中诞生的1000多万枚卵中，通常只有大约0.2%得以孵化。在刚孵化的幼龟中，一般只有1%可以成年。这一部分是因为阿里巴达本身，这个现象可以持续大约五个晚上。如此多的海龟在相对较小的海滩上产卵，这意味着后面的海龟会挖出并破坏前一晚诞生的海龟卵，这可能造成细菌感染，从而毁坏两窝卵。而且，孵育期至少45天，但是阿里巴达通常每隔一个月出现一次，所以一只筑巢的海龟也可能挖出并毁掉先前海龟产的卵。

秃鹫已经开始享用散落的龟卵残骸。它们不能从巢中挖出海龟卵，但是狗可以，有人的地方就会有狗。这里的狗对即将到来的海龟以及它们的卵和幼龟都是一种威胁。杰罗发出嘘声把它们赶走，但很快它们就又回来了。

他问我是否想进一步观看（海龟产卵），我点头表示同意。他小心翼翼地避开劳碌的龟尾，刷出一座沙桥，我往里看。巢中有一窝亮晶晶的白卵，每一枚有乒乓球大小。海龟的肉质产卵器从尾巴后面垂下来，我在观察中不禁为之着迷。它又产下了一枚珍贵的卵，接着喷射出一股透明黏稠的保护液，覆盖在可渗透的卵上。我们又看着它产下了几枚卵，然后杰罗将沙子封回原处，我们就坐了下来。

海龟巧妙地适应了环境。这些幸存者自三叠纪以来几乎没有发生变化，它们可以在野外生存一个多世纪，一直繁殖至进入老年。但是，在人类世（Anthropocene），在这个以人类为主导的时代，它们可能面临一百多万年来最严峻的挑战。开发活动、庞大的人口数量，还有同样众多的家犬扰乱了它们筑巢的海滩。单是灯光就引发了问题，这使依赖月光导航的海龟和幼龟晕头转向。它们因船只撞击和渔网缠绕而死亡或受伤，或者因误食塑料和其他污染物而死亡。过度捕捞和珊瑚礁被毁正威胁着它们的食物供应。气候变化也对它们造成了影响——海平面上升和

相应的海滩侵蚀缩小了可用于筑巢的区域，一些海滩已经变得无法使用，而温度升高正造成令人担忧的性别变化。海龟的性别取决于孵化卵的温度。较温暖的卵会发育成雌性，较凉的卵发育成雄性。生物学家报告说，全球变暖已经导致许多爬行动物的性别失衡，这对海龟的交配和生存造成了令人担忧的后果。上个月，这里异乎寻常地没有出现阿里巴达现象，缺乏可交配的雄性是疑似原因之一。

不过，到目前为止，对海龟威胁最大的是偷猎。世界各地都有人在海滩上宰杀正在筑巢的雌性榄龟，以获取它们的肉、皮和壳，海龟卵也被当作稀有的美味售卖。过去20年，仅仅一代人的时间就让全球种群数量减少了1/3。每年野生动植物的全球非法贸易额超过120亿英镑，这会威胁政府的稳定和人类健康，因为大约70%的人畜共患传染病例由此而来。非法野生动植物交易往往有组织严密的犯罪网络，这类网络会破坏政府对其他非法贸易（如武器和毒品贩运）的清查工作，并为地区冲突提供资金。通过eBay等跨境电商进行非法交易的时候，商贩往往将商品描述模糊化，或者将野生动物谎称为人工饲养的动物。

像杰罗这样的环保人士和政府管理员在阿里巴达期间会来这片海滩巡逻，但他们敌不过顽固的偷猎者。偷猎者在黑市上把卵作为壮阳药出售。在哥斯达黎加的加勒比海一侧，我看到有人公然在酒吧和咖啡馆里出售和食用海龟卵。那边海岸的莫因海滩（Moin beach）是濒临灭绝的棱皮龟的栖息地，那里的偷猎活动十分猖獗。万般无奈之下，年轻的环保人士（其中许多是志愿者）竞相前往筑巢地点，把海龟卵挖出，并在更安全的秘密地点重新掩埋。偷猎者中有许多人也参与毒品犯罪，而且使用暴力手段威胁和攻击环保主义者。2013年5月，一名年轻的环保主义者杰罗·莫拉（Jairo Mora）在收集海龟卵时被偷猎者绑架并杀害，没有人因此被判入狱。为保护哥斯达黎加及其他地区的野生动物而惨遭杀害的环保主义者越来越多，莫拉只是其中之一。2015年，全球共有185名环保人士在保护自然资源时遇害。这种死亡事件中，只有一小部分施害者会被定罪。

“当你晚上独自一人在这儿的时候，会担心自己的安全吗？”我问杰罗。“不，加勒比海（和别处）不同。”他说。接着他又承认：“有时候会。”自莫拉被杀之后，大多数环保人士都十分害怕，不再敢去巡查莫因海滩，有报道称偷猎行为仍在继续，而且无人抗议。然而，像杰罗这样的人看重保护野生动物，他们认为这是值得冒着生命危险去做的事情。

现在天已经完全亮了，快到早上6点了。杰罗累了，但带着笑容。曾经只有我们两人的海滩即将有人入侵。“我们的”海龟已经产完了卵——它用沙子小心地将它们盖好，笨拙地爬到岸边，与其他海龟妈妈一起返回海洋，每一位母亲都在物种延续中发挥着作用。看到满沙滩的海龟，并在夜晚过去、白昼来临时，目睹母亲为分娩下一代默默努力，我对这个美丽的地方有了不可思议的主人翁意识。在海滩接近村庄的一端，我看到一支约40人的队伍过来了，他们的手里拿着大大的米袋和篮子。

我们人类一直在利用环境资源来获取食物、能源，并满足所有其他需求。我们很擅长这个，这使我们成为非常成功的物种，我们比以往任何时候都更长寿、更舒服，因此我们现在主宰着地球。过去，我们的活动会导致局部的生物灭绝，而现在我们有70多亿人，我们的行为是工业化的、全球性的，这威胁着我们所依赖的资源。我们是否只能顺应自然界随处可见的本能，不断繁殖，直到环境崩溃，物种毁灭？我们会不会是第一个能够控制自己的物种？我们能否调节本能，限制我们对自然界的掠夺，让未来的环境一直具有可居住性？

在过去的几十年里，这里的社区一直在进行一项独特的尝试。这是一个有争议的环境保护尝试，旨在不破坏海龟种群可持续的同时造福当地的贫困村庄。奥斯迪欧娜是世界上唯一一个可以合法收集榄龟卵的地方。

玛莲娜·维加（Malena Vega）朝我走过来，她圆圆的脸上绽开了温暖的微笑。我们已经在电话里谈过几次，她很友好地提议我参加今天的活动。她抬头看着杰罗，杰罗确认海滩上有一千多只海龟在筑巢，这是合法收集海龟卵所需的最低数量。杰罗友好地挥了挥手，到研究站小憩去了，之后就是晚上的工作，这时喇叭声响起，大家要开始收集海龟卵了。

在20世纪80年代后期，村里的代表找到了研究阿里巴达的生物学家，询问是否可以采取措施，使海龟卵收集在可持续参数范围内合法化。他们担心村里突然到来的大量偷猎者偷窃海龟卵并恐吓当地人。他们与政府制订了一项计划，并设立了由妇女运作的奥斯迪欧娜自治开发协会，允许某些家庭在阿里巴达的前三个早晨收集数量有限的海龟卵。（无论如何，总会有一些海龟卵被后面的筑巢者所破坏，并且研究人员计算发现，移除早期的海龟卵后，孵化率会提高5%。）作为协议的一部分，该协会清理海滩，保护海龟和它们的卵免受偷猎者的影响，管理在阿里巴达时大量涌入奥斯迪欧娜的游客。收集的卵可以得到销售许可，售价与鸡蛋相同，这是为了阻止黑市交易，收入用于社区项目。

在我的周围，当地的男男女女在沙滩上跳起了塔兰泰拉（Tarantella）——他们通过用赤脚轻轻踩踏的方式寻找巢穴。每个人身上都有海龟图案，有的人戴着海龟项链，有的人穿着印着海龟的T恤。他们一个接一个地停下来挖洞。现在海滩上只有很少的海龟，下一拨海龟直到夜幕降临才会上岸。玛莲娜蹲在我旁边，她的双手在沙子里有节奏地移动，以发现下面密集的龟卵。这里正是我刚才观察过的那只海龟的巢穴，我见证了它筑巢、产卵、掩盖的全过程——意识到这一点，我的心像石头一样掉到了肚子里。

“过来——”玛莲娜叫起来。我走过去，她抓住我的手，把它推进洞里。“你能摸到吗？”她问道。我翻找了一会儿，但仅摸到了沙子，不禁泄了一口气。玛莲娜自己把手伸进去，熟练地取出了几枚卵，放在她的口袋里。“再试试。”她跟我说。

这一次，我依照玛莲娜的角度把手伸进去，摸到了海龟卵。我拿出来一枚，玛莲娜为我喝彩。她分几次把手伸入洞中，取出了成捧的海龟卵，放进口袋。她清空了巢穴，把沙子重新覆盖好，然后移动到几米远的地方，开始挖另一个巢穴。我坐着，手里拿着我找到的那枚卵。它柔软、温暖，有着革质的手感，被手握住的地方凹陷了下去。我成了噩梦中的小偷，母亲离开后，我把育儿室洗劫一空。这与我所接受的对环境负责的文化截然相反——偷卵已经够糟糕了，而偷走受保护物种的卵更是不可原谅。

玛莲娜大声说："你可以就这样生吃。"随后她演示了一番：撕开蛋壳，将"内容"抛到嘴里。在我周围，短短的时间内，人们的口袋都已经装满了海龟卵。这里的黑沙滩已经很热了，大家都想回到村里的阴凉处。我帮玛莲娜系好她的口袋，我们一起吃力地越过沙滩走回她的家。途中我们频繁地停下——没想到海龟卵竟然这么重。玛莲娜是开发协会的会长，她告诉我，这个项目改变了社区。奥斯迪欧娜是一个贫穷的小村庄，夹在两条河流之间，在山脉和海洋旁边。在雨季，当河流泛滥时，村庄与外界的联系完全被切断，村民必须靠储存的食物生存。许多人抛下奥斯迪欧娜去了城市，那里有工作。她说，现在海龟卵的交易许可给人们提供了最低生活保障，村里的培训、生育保险和养老金也有了资金支持。人们正在返回村里，在这里谋生。"海龟是我们的命根子，"她说，"我们爱它们。它们在这里对我们来说意味着一切。"

"但这难道不是简单地将你之前的偷猎合法化吗？"我问她。"以前，这是一个危险的地方，"玛莲娜说，"海滩很脏，到处都是偷猎者。警察来了还有枪战。我的祖母就被误射，去世了。在那之后，大家就说：不能再这样了！这是我们的村庄，这些是我们的海龟。"这位女士现在已经是一位祖母了，她坚定的决心，还有她和其他女村民取得的成就深深地打动了我。

我们现在比以往任何时候都更需要世界资源，这是为了发展贫穷国家的经济，支持我们不断增长的人口。但我们需要找到一种可持续的方式。玛莲娜和她的邻居们在奥斯迪欧娜进行的尝试，也正应用于雨林中的木材和海洋中的鱼类。现在判断我们是否真的能够将这些濒危资源的开采限制在可持续的水平还为时过早。但早期迹象表明，如果把生活在这些脆弱环境中的社区的长期需求考虑在内，生态系统就能得到更好的管理，或许这样唤起了我们人类独特的利他主义倾向，让我们关心其他物种，同时照顾家庭环境。

我们现在已经到了玛莲娜的家，这是一栋简单的木结构住宅，用嵌板隔开，她与女儿、孙女和几只鸡住在那里。"你一定要尝尝玉米饼。"她笑着列举玉米饼对健康的益处。当她在炉子上加热平底锅、切碎香菜和洋葱、烹饪刚刚收集到的海龟卵时，我认真思考了我们赋予生物的价值是多么奇怪和随意，由此而来的结果是致命的。许多环保人士认为，由于保护了海龟卵的市场，这里的合法收集会促成对杰罗·莫拉的谋杀。然而，我却看到海龟卵市场对奥斯迪欧娜经济的重要性如何给予海

龟更多的保护。

在人类主导的新时代，我们不能再让自然世界在我们的冲击下自生自灭——那样的话，只有杂草才能生存。如果我们想看到野生动物，就必须积极地保护它们。在全球范围内，海龟对我们来说几乎没有什么实际用处。然而，我不想生活在不再有海龟的世界里。当我们试图在人类需求和自然界诉求之间寻找出路时，奥斯迪欧娜告诉我们，这不是一个非黑即白的问题。事实上，为了保护野生动物，我们必须保护人类的生命。

煎海龟卵真是美味。

气候变化

CLIMATE CHANGE

文/达姆·朱莉娅·斯林戈（Dame Julia Slingo）

沿革

气候变化将是21世纪的关键挑战之一。应对气候变化关乎我们未来的繁荣、健康和福祉，以及地球自然环境的永续利用。2015年，190多个国家同意采取行动，将地球表面温度的升高限制在2℃以下，如果可能的话，最好不超过1.5℃。未来几代人很可能会将2015年视为人类努力使政策与科学相符合的一个转折点。不过，我们应该如何理解这一切？气候变化的巨大挑战对我们的生活方式和安身之处又意味着什么呢？

让我们从这两个词说起：气候和变化。气候一词描述的是风、温度和降雨等（我们认为的）稳定因素的长期平均值，在这里，长期通常指超过30年或更长的时间。这是我们每年、每季都能预知的情况。许多社会和经济体很好地适应了当地目前的气候状况，印度就是一个例子。季风雨的定期回归对水、粮食和能源安全至关重要，季风的延迟或爽约都可能对国家经济产生巨大影响。有一则众所周知的谚语——有人说这是马克·吐温说的，但这最有可能是英国地理学家、牛津大学教授安德鲁·约翰·赫伯森（Andrew John Herbertson）说的——“气候是期待，天气是结果”。因此，考虑气候时，我们还需要考虑构成气候的天气范围，特别是较极端天气发生的频率以及可能造成的影响。事实上，我们认为气候变化对人类造成的最深刻的影响恰恰关乎极端天气，包括风暴、洪水、野火、风暴潮和热浪。

变化意味着与常规不同，但是我们该如何定义常规呢？我们的天气和气候在数小时到数十年的各种时间尺度上不断地变化，这种变化是定义气候的一个要素。还有一种界定方法：当气候超出现代文明已经习惯的范围时，我们就认为气候变化了。事实上，科学家正是依据这一点得出了气候变化的明确结论。

然而，回顾历史，我们会发现地球的气候显然总是在变化的，地球经历过冰河期的开始和结束，也经历过升温，二氧化碳比遥远的过去多得多。那么我们现在为什么要烦恼呢？

有三点将当前的气候变化与过去的变化区分开来。第一点在于变化的根源。今天，我们的气候正在发生变化，是因为大气中温室气体，特别是二氧化碳的浓度正在上升，而且上升得很快。我们正在把数百万年

来以煤、石油和天然气的形式结合在一起的古老的碳元素，在短短几十年的时间内通过燃烧释放到大气中，以满足我们对能源贪得无厌的需求，并支持工业和现代生活方式。我们试图调整地球生物圈吸收碳元素的方式，帮助改善过度伐木和海洋酸化导致的碳排放超标。二氧化碳是一种温室气体，它反常而迅速的增加正引起地球温度上升，这会影响天气和自然环境，引发更极端的热浪、干旱和洪水，导致海冰和冰川消融。回顾过去的气候变化时，我们会发现，地球公转轨道的缓慢变化才是关键。这些变化最初影响大气温度，接着通过大气中二氧化碳含量和自然生态系统之间的关联施加影响。因此，过去的变化是由迥然不同的驱动因素引起的，虽然我们可以从中学到一些东西，但那与我们今天所经历的气候变化没有可比性。

第二点在于气候变化的速度。现在，地球的二氧化碳水平比100多年前高出30%以上，事实上这比至少80万年以来的任何时候都高出30%以上。地球表面的平均温度在过去的一个世纪已经上升了1℃，在2050年将升高2℃，如果我们不严肃对待，情况会更糟。这些数字可能听起来很小，但我们应该记得，上一次冰河时期的地球温度变化仅为5℃！通过快速释放古代的碳，我们实际上切断了生态系统针对气候变化进行调节的自然反馈循环。我们可以看到，这已经导致一些物种丧失栖息地，还有一些物种的周期性习性和季节变化有关，因此也受到了极大的影响。对许多植物和动物而言，气候变化太快，它们来不及迁移或适应。在未来几十年，这可能对许多自然生态系统的可持续性产生深远的影响。与此同时，我们正在对古老地层中的含水层进行掠夺，我们从主要河流中不断抽取水资源，甚至没有多少水能流入海洋。换句话说，我们正在打乱对地球至关重要的水循环和碳循环，让地球的命运陷入未知。

第三点关乎人口规模。地球的人口正在递增，城市正在迅速发展，通常沿着海岸线进行扩展。我们的世界纵横交错，日益复杂，我们依赖全球电信、高效运输系统，以及食物、能源和水的弹性供应。这些本来就容易受到恶劣天气和气候条件的影响，气候变化带来的额外压力造成了一系列新情况，让我们的未来安全面临挑战。世界气候变化对我们的生计、财产、福祉和繁荣造成了巨大的直接和间接影响。

是的，我们完全有理由忧虑，却几乎没有时间采取行动。早在1990年，英国前首相玛格丽特·撒切尔就认识到了气候变化带来的威胁：

我们现在可以说，鉴定报告已经有了，它指出了问题，我们需要立即开始纠正……如果收到预警，却不采取任何措施，或抱定这种态度：“就这样吧！我也活不了那么久！”那么我们的后代将面临巨大风险。问题不在将来，问题就在此时此刻。受影响的是我们的下一代，他们正在成长。

在过去的25年里，越来越重要的科学证据和其他一切都证明了问题的紧迫性，但我们仍然在拿未来冒险。

已知和未知

自前工业时代以来，地球的气温已经上升了约1℃。自1979年有相关记录以来，北极的夏季海冰面积已减少约40%。自20世纪90年代初以来，海平面每年上升约3毫米。自1850年以来，以30年为单位统计的地球表面温度数据持续升高。我们比以往任何时候都更有把握，那就是，20世纪50年代以来，人类已经成为气温上升的“主要原因”（出自联合国政府间气候变化专门委员会2013年第五次评估报告）。

虽然我们经常谈到未来气候预测的不确定性，但有一些事情我们是可以确定的。我们知道地球将会继续变暖，我们知道，随着气温升得更高，气候变化的不利影响会不成比例地增大，出现不可逆转的灾难性变化的风险会增加。我们知道，在我们稳定了地球表面温度很久之后，海平面还会继续上升，冰盖和冰川会继续融化。

我们也知道，无论未来的碳排放情况如何，大气中既有的碳积累都会导致某种程度的气候变化。这意味着，无论如何，我们多多少少都要适应变化。洪水防御、海岸防御等情形要求的投资规模，失败的风险，以及基础设施的使用周期和交付周期，这一切加在一起，意味着将来的投资可能对未来20～30年的气候变化高度敏感。我们现在就要计划如何使城乡生活不受气候影响，并保护自然环境。

地球的气候非常复杂。观察和模拟可以让我们了解导致气候演变的各种相互作用。我们认识到，海洋吸收热量的能力极强，这对未来几十年气候变化的全球和区域表现至关重要。我们知道，陆地生物圈（植物和土壤）对气候变暖和降雨模式变化的反应很可能会减少有效的碳汇，放大人类造成的温室效应。简单的物理学原理告诉我们，温暖的空气含有更多的水，因此气候变化将导致更多的极端降雨和洪水事件。我们还应该清醒地认识到，虽然科学在进步，但是气候系统中几乎没有什么能抑制温室气体排放造成的影响。我们知道得越多，我们面临的现实就越令人不安，情况可能比我们之前想象的更具挑战性。

谈到针对不可逆的危险气候变化评估风险，值得一提的是，近年来我们在建立新一代气候模型方面取得了显著进展，我们模拟的地球系统更加接近真实情况。这项研究非常重要，因为单凭观测我们无法知道地球在未来会如何演变，我们甚至无法知道地球曾经经历过什么。应对气候变化的关键决策非常需要这些信息。

到了2015年，百年之内的地球表面温度升高幅度超过了1℃的阈值，这是《巴黎协定》设定的2℃上限的一半。如果不突破这个上限，那么我们本世纪能够使用的碳预算只剩下1/3。而新的科学证据告诉我们，这已经是非常乐观的数字了。永久冻土融化的影响，以及生物圈在化解碳排放问题上的局限表明，我们的余地比我们想象的更小。因此，如果我们想赢得地球的未来，明智的做法是采取谨慎的态度，因为最坏最危险的气候变化很有可能出现，这显然令人不安。我们不应将缺乏确

定性当作不作为的借口。

2050年的气候

从气候的角度看，2050年并不遥远，我们可以较为准确地描绘那时的气候图景。我不会详尽地探究事实和数据，但我会试着描述，如果我们不设法大幅度减少排放，那么我们的世界可能面临什么样的恶果。例如，我们知道世界上最贫穷的人将会感受到最严重的影响，他们已经承受了巨大的压力，而且手头没有什么资源可以帮助他们生存下来。

让我们快进到2050年。地球表面温度比一个世纪前高出了2℃，同一时期全球海平面又升高了30厘米。这时，北极夏季无冰，海洋温度也在大幅上升。海洋哺乳动物、鱼类和鸟类的数量正在发生变化，当地居民缺乏食物保障，处境日益艰难。沿海海冰减少、海平面上升，以及恶劣天气的增加，迫使一些社区进行搬迁。北极对外开放，拥有了国际贸易的主要航海线，人们开始快速开发北极的自然资源。人类活动增加带来的新入侵物种正在改变自然生态系统。

在印度，季风前的高温严重影响着大部分人口，特别是北部平原地区人口。因为每日的降水强度增加，季风季节的洪水也越来越严重。随着海平面上升，生活在沿海低洼地区的居民在风暴潮期间会经历越来越频繁的海水入侵。饮用水遭到污染，农田遭到破坏，水源性疾病越发普遍。人们被迫迁移的问题日益严重。不过，从积极的一面来看，空气质量已大幅改善，受呼吸系统疾病影响的人较少。

在热带地区，主要城镇和城市的基础设施建设和维护变得更加困难，因为白天的温度经常超过户外安全工作的临界值。空调的电力需求给电力供应带来越来越大的压力。

由于海平面上升，一些小岛屿国家（例如太平洋中部的基里巴斯）已不再适宜居住，那里的人没有了国籍，前途不明。在另一些国家，珊瑚褪色变白，渔业发展不再具有可持续性，人们将面临食物短缺。作为这些经济体重要组成部分的旅游业已经消亡。

澳大利亚南部和包括中东在内的地中海地区，将长期处于干旱和极端暑热之中。森林大火变得越来越危险，这威胁着人们的房屋和城市环境，而且会破坏自然生态系统。由于蓄水层消耗殆尽，用水安全问题正变得越来越严重。

在英国和北欧，极端温度情况增多，降雨量增多，天气越来越反复无常。当地人对防洪工作加大投入，并学会了如何管理环境，减轻气候变化带来的一些不利影响。夏季热浪变得越来越普遍。气温上升导致积雪减少，适合滑雪的冬季变得越来越短。但是，作物的生长季节变长了，这为粮食生产和旅游业的多样化提供了机会。

展望2050年的气候图景之后，我们应该清醒地认识到，气候变化将成为塑造未来社会和经济的决定因素。我们应该成为自然生态系统多样性的守护者。在一切地球自然资源之中，水很可能成为最珍贵的商品。地区降雨模式的变化，上述变化对可用水和水质的影响，以及跨国界河流和含水层的法律归属问题，都将是我们未来几十年的焦点。

到目前为止，关于气候变化的争论主要受制于气候预测的不确定性和处理该问题的经济后果。气候变化将日益成为一个道德问题。显然，世界上最贫穷的人受到的影响将最为严重，气候变化有可能使他们的社会经济发展脱轨。正如联合国人权事务副高级专员弗拉维亚·潘西里（Flavia Pansieri）在2015年指出的："人为引发的气候变化破坏的不仅是我们共同的生态系统，还有我们的健康权，我们获得食物、水、卫生设施、舒适住房的权利，以及小岛屿国家和沿海社区人民的自决权。"展望未来，保护基本人权方面的考虑，以及发达国家在支持发展中国家时的作用，可能从根本上改变我们关于应对气候变化的争论。

我们的选择

2015年是一个里程碑：世界各国不仅签署了《巴黎协定》，还在《仙台减灾框架》上签了字，承诺共同努力，大幅度减少灾害风险，让人们避免由此而来的生命、生活质量和健康损失，各国一致同意联合国可持续发展目标，立志终结贫困和饥饿，改善医疗和教育，使城市更具可持续性，同时保护海洋和森林。应对气候变化对实现每个目标都至关重要。

如果不承认我们的生活方式必须改变，我们就无法应对全球变暖。我们需要改变生产、储存和使用能源的方式，学会应对更多的极端天气和气候。其中一个关键是做好准备。天气和气候预报的持续发展有助于我们提高适应性，有了准确的预警，我们就能预先做好准备。我们的行动和对自然环境的反应越来越多地影响着环境以及我们感受到的天气和气候危害。为此，我们需要在环境风险的端到端评估方面取得重大进展——从最初的灾害（如洪水）到实现风险最小化的具体行动（例如实施排水新方案或种植树木），再到成本效益比的评估。这需要将天气和气候模拟与先进的建筑环境和生态系统建模相结合，而且我们还要更深入地了解人类动力学以及金融和社会经济因素的建模新方法。

虽然缓解气候变化的重点在于减少二氧化碳的排放，但大气中还有其他污染物（例如碳黑和含硫酸烟雾），减少这些污染物的排放可以改善空气质量，从而保护人类、植物和动物的健康。中国就是一个很好的例子。治理糟糕的空气质量是中国当前转向低碳经济的主要动力。但是这里也存在风险：清除目前能够冷却地球的大气污染物也可能导致世界某些地区近期加速变暖，并对区域气候变化产生不利影响。因此，通过减排缓解气候变化涉及很多复杂的过程，从最新的地球系统科学到社会经济评估，我们需要综合各方面，得到最合适的方案。

减缓气候变化的另一个关键议题是地球工程的作用。这涉及通过太阳辐射管理或直接从大气中去除二氧化碳，这意味着对地球自然系统进行大规模人为干预。日渐明显的是，为了实现《巴黎协定》设定的温度目标，我们可能需要使用具有碳捕获和储存功能的生物能源（Bioenergy with Carbon Capture and Storage，BECCS），从大气中大规模地去除碳。（尽管美国总统唐纳德·特朗普于2017年6月宣布美国将退出《巴黎协定》，但在撰写本文时，美国的立场仍不明确。）[5]这些技术必须在全球范围内实施，才能对大气中的二氧化碳水平产生显著影响。

对太阳辐射管理——比如用微粒改造云使其更具反射性，或将气溶胶注入平流层，从而将更多的太阳辐射反射回太空——我们还需要正确认识其潜在的影响。我们不仅要考虑全球地表温度，还应考虑区域气候，以及用水和粮食安全受到的牵连。我们对这些还不够了解，我们需要参照为温室气体排放的区域影响投入的科研精力，对这些问题进一步研究。社会、法律和政治因素使这些技术备受关注，任何国家都可以在没有适当考虑其全球影响的情况下单方面采用这些技术，但国际治理机制仍然需要落实到位。

最后，无论通过哪种方法将适应（应对气候变化带来的影响）和解缓（把气候变化的水平降到最低）相结合，我们都应该让工程师和技术人员提出创新方案，解决几十年内清洁能源生产、储存和供应的问题，并尽可能减少对全球经济的破坏。与此同时，每个人都要保护自然环境，为子孙后代履行生命守护者的责任。这意味着我们当中那些有能力的人需要对生活方式和生活地区做出选择，同时还要支持那些没有选择的人。

小结

毫无疑问，气候变化将在未来深刻地影响我们所有人，但值得记住的是，不了解我们可能面临的问题时，我们不可以盲目前进。

计算机模型可以模拟地球的气候，使我们根据基本的物理原理预测天气和气候演变，这是过去50年来最伟大的科学成就之一。现在，谈到气候预测，我们可以满怀信心地展望未来，这种信心在其他科学领域并不多见。

比格尔号船长、海军中将罗伯特·菲茨罗伊（Robert Fitzroy）说的话值得我们深思。他曾带领查尔斯·达尔文（Charles Darwin）踏上极其重要的旅程，他也是英国气象局的创始人，而且发布了第一份公共天气预报。在1859年一场可怕的风暴中遗失了皇家特许状后，他写信给《泰晤士报》，信中写道：“人类仍然不能平息肆虐的大风，但可以进行预测。人类无法缓和风暴，但可以避开风暴的猛烈侵袭，正确使用所有可用于（海难）救生的设备，可以极大地减轻这些可怕的灾难带来的影响。”

早在150多年前，菲茨罗伊就开始了漫长的预测工作，以此减少和应对恶劣天气影响，这些方法现在依然适用。从全球到地方，从数小时到数十年，我们对天气和气候的认识，以及我们所做的预测，使我们能够规划未来，并有助于保障我们的安全。

不过，让我们把结语留给在英国出生的宇航员、气候科学家皮尔斯·塞勒斯（Piers Sellers），他在2016年12月死于胰腺癌。去世一年前，接受诊断后，他撰写了一篇感人的文章发表在《纽约时报》上，阐述了他对气候变化的看法：

新技术一直在以我们无法预料的方式改善着我们的生活。如果认真应对各种挑战和风险，没有令人信服的证据表明我们不断变化的未来会比现在更糟。历史上，我们人类走出困境的例子不胜枚举。成功者往往是现实、务实和灵活的，失败者却往往否认威胁的存在……

作为一名宇航员，我在地球上空354千米的地方进行了太空行走。在国际空间站旁飘浮着，看飓风在海洋上翻滚，亚马孙河穿过一片翠绿色的森林，蜿蜒流向大海，巨大的夜间雷暴在赤道附近闪耀，照亮方圆数百千米。从这里俯视，我能感觉到地球是多么脆弱和珍贵。我对地球的未来充满了希望。

第二部分　我们的未来

THE FUTURE OF US

未来医疗/基因组和遗传工程/合成生物学/超人类主义

未来医疗

THE FUTURE OF MEDICINE

文/亚当·库哈尔斯基（Adam Kucharski）

2016年4月26日，美国宾夕法尼亚州发现用显微镜才能看到的新威胁。就在举国关注当天在该州举行的总统初选时，一名有细菌感染症状的妇女来到一家诊所。医生取了她的尿样，测试显示大肠杆菌是罪魁祸首。但是当分离物被送去进行进一步检测时，结果证明这种大肠杆菌并非普通菌株。

带着对药物抗性的担忧，当地实验室立即开始测试样品对一种名为黏菌素的抗生素的抗性。黏菌素发现于1949年，是一种所谓的“不得已的药物”。它会对人的肾脏造成损害，医生并不常开这种抗生素，它只用于应对伤害较小的抗生素不管用的情形。这就是宾夕法尼亚州这个样品不寻常的原因：它含有一种基因，可以使细菌对黏菌素产生抗性。虽然卫生机构已经在世界其他地方发现了该基因，但这是它首次在美国被发现。幸运的是，宾夕法尼亚州的样本对所有抗生素都没有表现出抗性，但它证明了传染病正在瓦解我们的防线。当时的美国疾病控制和预防中心主任汤姆·弗里登（Tom Frieden）说：“这基本上是在告诉我们，这种治疗方法离终结不是很远了。”

50年前，这话听起来还很荒谬。20世纪60年代是乐观的时代。像青霉素这样的抗生素已经被广泛而有效地使用了将近10年。艾伯特·萨宾（Albert Sabin）研制出一种脊髓灰质炎疫苗，可以和方糖一起服用。结核病等疾病终于可以治愈了。1967年，美国公共卫生部部长威廉·斯图尔特（William Stewart）甚至声称：“（人类）对抗传染病的斗争已经胜利了。”

然而，这场斗争直到今天也没有结束。人们紧锣密鼓地进行疫苗接种，脊髓灰质炎却一直没能根除。耐药性“超级病菌”使青霉素失效，结核病再次成为致命的疾病。与此同时，新流行病——也许是流感，也许是其他传染病——像幽灵一样不断作祟，人口老龄化又带来更多的健康挑战。不过，我们也看到了医学非凡的进展——从遗传学和个性化治疗，到再生医学和远程手术。医学进展把我们带到了什么地方？我们应该乐观还是悲观？医学的未来会是什么样子？

下一次流行病暴发

医学界常常发生出人意料的事情。威廉·奥斯勒爵士（Sir William

Osler）在20世纪初就提倡进行现代医学培训，他曾将自己的领域称为“概率艺术和不确定科学”。就拿传染病来说，在有生之年，我们极有可能赶上下一次病毒大流行。至于具体是哪种病毒，在什么地方、什么时候流行，我们只能据理推测。

1919年，奥斯勒本人死于臭名昭著的“西班牙流感”，这次流感造成的死亡人数超过了第一次世界大战期间的死亡总人数。21世纪已经出现了几次新的病毒威胁，包括2003年的SARS、2009年的甲型H1N1流感（俗称“猪流感”）和2014年的埃博拉病毒。这三种病毒都会引发重大疾病，但它们具有对我们有利的生物学特征。SARS或埃博拉病毒的患者在有传染性时通常会表现出症状，这意味着卫生机构可以找到他们最近接触过的人并进行隔离，使疫情得到控制。用这种方式追踪流感要困难得多，但幸运的是，2009年的流感毒株远不及1919年毁灭性的变种那么致命。

这种运气很重要，因为在新的疫情暴发期间，我们常常缺乏有效的药物和疫苗。这是一个时间跨度的问题：相关研究工作往往需要数年或数十年才能得出成果，而流行病可能只持续数月。因此，我们至今仍然没有有效的SARS疫苗，而猪流感疫苗在2009年年末才出现，这时疫情高峰期已经过去。不过，情况正在发生变化。在2014—2015年埃博拉疫情显现期间，研究人员加快了疫苗的研发。在不到一年的时间里，由世界卫生组织领导的一项临床试验确定了一种高效的埃博拉疫苗。研究成果按计划会在下一步出现新的感染时推出。这意味着我们拥有了经过初步安全测试的药物和疫苗储备，以及能够在疫情暴发的艰苦条件下立刻开展临床试验的研究团队。2017年，部分政府和生物医学基金会发起了流行病预防创新联合会（Coalition for Epidemic Preparedness Innovations），以帮助解决这一问题。此举的目的在于投入10亿美元的资金用于疫苗研发，最初集中攻破三种传染病：中东呼吸综合征、拉沙热和尼帕病毒。所有这些病毒已经从被感染的动物蔓延到了人群中，但尚未造成可怕的大规模疫情。

即使我们已经准备好疫苗，只等接受新疾病威胁的检验，我们也必须在疾病发作时认出它才行。在控制流行病方面，我们未来的成败很大程度上取决于我们如何收集和分析数据。例如，除了检测传染病之外，我们现在还可以收集和比较患者身上的病毒或细菌的基因组序列。在2014年埃博拉疫情暴发之初，这个过程用了数周时间，最后，现场团队可以在数小时内用记忆棒大小的设备对病毒进行测序。从埃博拉病毒到流感病毒，未来的人很可能会对每种传染病都进行常规测序，以了解不同的病原体是如何传播和演变的。如果我们想要追踪使现有药物或疫苗变成冗余的突变，这一点将尤为重要。

未来几十年，耐药性感染话题可能会占据医学界的头条。人类和养殖动物过度使用抗生素会导致细菌感染无法治疗，将来有一天，剖腹产和髋关节手术等常见的手术可能变得非常危险。这不仅仅是能否开发更多药物的问题。目前市场上最新的抗生素是在1987年被发现的。抗生素

价格昂贵，研发难度大，不过大多数患者只需要服用一到两周，这意味着医药公司将日益把研究重点放在其他药物上。因此，想要应对抗生素的耐药性，我们需要更好地管理现有的治疗方法，这意味着改变人们的态度和行为。但这些东西研究起来很棘手。是什么影响了人们对健康的看法？人们的行为如何影响患病的风险？怎么能说服人们改变治疗方法？解决这些问题需要综合应用生物医学以及社会科学。

更好地认识人的行为对于应对其他类型的传染病也很重要。例如，减少危险行为可能有助于控制西非的埃博拉病毒。许多感染源于家庭活动和葬礼，当人们改变这种行为时，疾病传播常常会减少。但是，我们仍然不完全了解这些变化如何以及何时在西非发生，以及这对未来有多重要。

卫生研究人员越来越多地研究人们如何在世界各地迁徙和交往。他们通过问卷调查、手机数据和卫星图像来进行这项工作。不久，这些数据就可以与其他信息联系起来，从基因组序列到环境分析，让我们全面研究各种规模的传染病。我们不仅要关注疾病的生物学特征和对特定人群的影响，同时也要分析传染病及其演化和环境，还有人类患者的行为。这样，卫生机构就能针对不同的人群和地区制定疾病控制策略，在一个人的感染史可能影响未来疾病风险的情况下，这尤为重要。登革热就是一个很好的例子：如果一个人曾经暴露于一种登革热病毒株，那么他的第二次感染会更加严重。正因如此，2016年由世界卫生组织协调的一项研究建议登革热疫苗接种活动考虑人群的感染史。目前，这项研究需要采集大量的血液样本，并进行耗时很长的实验室检测。然而，新的血液检测技术已经使得识别以前在人群中传播的病原体变得更容易，成本也更低廉。随着可用的数据变得更多，这些定制方法最终将成为每个国家应对每种疾病的标准。

定制医学

个性化方法也将在其他医学领域变得较常见。2015年，美国总统巴拉克·奥巴马（Barack Obama）正式推出了精准医疗计划，目的就是根据患者的遗传特征、环境和生活方式制定治疗方法，而不是采用一刀切的方法。这是医学的一个大趋势，其方法越来越关注患者个体及其病情。尽管输血等过程已经在一定程度上考虑了个体差异，但更加明确的方法将使用基因组测序和其他新测试，让某些治疗方法对个体的影响更加容易预测。例如，一些抗癌药物仅对具有特定遗传特征的肿瘤有效。与之类似，一种名为依伐卡托的囊性纤维化药物只对大约5%有特定基因突变的患者有效。

精确的方法将使医药不再如此被动，并且更具前瞻性。详细的数据可以帮助我们在疾病成为问题之前降低风险，而不是等到疾病出现再进行治疗。基因检测已经使预测遗传性疾病成为可能，但这些疾病通常聚焦于一种有害的突变，如BRCA1基因突变。如果女性携带BRCA1基因，

那就意味着她一生中患乳腺癌的风险约为65%。在这种情况下，她可以通过抢先进行手术降低风险。正是由于BRCA1突变，女演员安吉丽娜·朱莉（Angelina Jolie）在2013年向公众宣布决定切除双侧乳腺。

要检测的不仅仅是特定的基因，最后，针对整个基因组的监测也会变得更常见。这意味着相关数据的增多。美国冷泉港实验室（Cold Spring Harbor Laboratory）的研究人员估计，到2025年，人类基因组数据需要的计算机存储空间将超越油管和推特。然而，基因组测序的成本并未包含复杂数据分析的操作成本。在一些情况下，单个基因与特定疾病之间的关联（如BRCA1和乳腺癌）已经在大量的临床医学研究中得到了证实。

理想情况下，我们期望所有疾病都遵循如下一套简单的规则——基因B中的突变A引起疾病C。遗憾的是，如果多个基因与一种疾病有关，或者这种疾病很少见，那么评估风险就会难得多。这可能使选定预防性治疗方法变得更困难。

为了说明医学检验结果（无论是遗传检验结果还是其他结果）有多难解读，我们假设有一种每100万人中有500人会患上的疾病。有一种针对这种疾病的检测方法，准确率为99%。如果你参加了这个测试并且结果呈阳性，那么，你患上这种疾病的概率是多少？值得注意的是，答案仅为5%。这是因为对100万人进行测试时，我们预计495人将呈阳性并且患上这种疾病（测试只有99%的准确度，所以患病的不是全部500人）。与此同时，其他999500人中有1%（9995人）不会得该病，但将被错误地检测为阳性。因此，测试结果呈阳性的总人数将为495 + 9995。其中，只有495人（5%）实际上值得为此烦恼。

请记住，这里假定测试准确率为99%，这已经是很高的准确率了。如果测试的可靠性差一点，那么事情会变得更难以解释。这就是为什么诊断通常还涉及其他因素，如家族病史。目前，面临此类问题的人可以从遗传咨询师那里获得信息，专业人士可以解释这些风险是什么、意味着什么。咨询师通常提供信息，而不提供建议。然而，随着基因检测变得越来越普遍，选项可能变得更加复杂，做出选择也变得更加困难，特别是在可用的治疗措施有限的情况下。你想不想知道自己是否有患上无法治愈的疾病的风险？你如何处理非决定性测试结果的不确定性？

随着患者掌握的数据增多，做出决策的责任将逐渐远离医生。总有一天，我们会自己管理预计的健康风险。我们必须选择要使用的数据，以及如何根据这些数据行事。这意味着平衡潜在的利益，抵消误诊可能带来的危害。2016年，明尼苏达州梅奥医学中心（Mayo Clinic）的医生发表报告称，基因检测结果显示，一名男子和他的家人将面临危险的突变，之后，这名男子通过手术在皮下植入心脏除颤器。然而，当他们第二次前来征求医疗意见时，却发现测试结果被曲解了：实际上他没有面临重大疾病的风险。

对遗传测试结果感兴趣的不只是患者。在美国，由于2008年的《反遗传基因歧视法案》（*Genetic Information Nondiscrimination Act*），医疗保险公司目前不可以以基因突变为理由拒绝承保。但人寿保险公司的情况有所不同：有些人寿保险公司拒绝接待携带有BRCA1突变的申请人。如果法律跟不上预测医学的快速发展，那么遗传健康风险也会开始影响人们住房和就业等方面的权利。

随着我们对遗传疾病的了解不断深入，它也可能模糊我们对患者的定义。2015年，一名女士将伦敦圣乔治地区的英国国民医疗服务系统告上英国高等法院，因为该系统没有告知她，与她失和的父亲患有遗传病亨廷顿病。医生曾建议她父亲在2009年确诊时将这一消息告知女儿，但他拒绝了。女儿当时已经怀孕，在2013年才发现自己患有此病。在这种情况下，医生是否应该向患者的家庭成员提供信息？这一次，法官得出的结论是，保密是恰当的。这是法院首次裁定医务人员是否应该向家庭成员披露遗传风险，不过，这类问题在未来很可能会越来越多地出现。

随着医学的焦点从急性疾病转为慢性疾病，家庭的重要性也将凸显。心脏病、糖尿病和肥胖等疾病长期以来一直是困扰富裕国家的问题，现在此类病例在低收入和中等收入地区也增多了。1975—2014年，全球男性肥胖率从3%左右上升到11%，女性肥胖率从6%左右上升到15%。具有讽刺意味的是，改善医疗条件也会导致慢性疾病增多，因为目前许多致命的疾病在未来会变得可以预防，或者易于控制。在未来几年，研究人员将找到减缓或控制阿尔茨海默病等退行性疾病的新方法。植入式设备将监控患者的情况，并相应地调整治疗方案。干细胞将帮助修复或替换受损的身体组织。近期，日本理化学研究所（RIKEN）的发育生物学团队宣布，他们已经在实验室成功培养出了小鼠皮肤，包括同腺体和毛囊。也许，此类研究的最终目的不是使用从身体其他部位取出的皮肤来治疗重度烧伤等损伤，而是让新皮肤的使用得到推广。与此同时，其他团队一直在研究如何用实验室培养的组织修复膀胱、角膜、卵巢、血管等器官。医疗保健服务的改善意味着我们能比以往任何时候都活得更长。在更先进的医疗条件下，延长寿命成为可能，社会需要做出调整，以应对提供这种长期护理的成本——包括经济成本和情感成本。

进一步互联互通的世界

社会结构也会以其他方式影响我们的健康状况。1970年，人口超过1000万的城市只有两个：东京和纽约。2017年即将到来的时候，这样的“超大城市”已经有37个了。许多生活在这些城市中的人都处于贫困状态，未来几年，情况可能会变得更糟。联合国估计，到2030年，可能有多达20亿人生活在贫民窟。埃博拉病毒和登革热等传染病容易在贫困和人口密集的环境中迅速蔓延，这可能打卫生机构一个措手不及。几十年来，人们并未将埃博拉病毒视为一种需要得到重视的健康威胁。它在中非造成过20多次小规模的出血热暴发，主要发生在农村地区，但几乎没

有人认为它可能会引起流行病。接着在2014年，同样的传染病袭击了西非的三个城市，情况迥然不同。我们可能很快发现其他在农村地区吃力地挣扎的类似病原体，到了建筑物林立的地区便迅速蔓延。

大城市也隐藏着其他健康风险。美国健康指标和评估研究所（US Institute for Health Metrics and Evaluation）牵头的研究表明，由于空气污染，全世界每年有超过550万人早逝。死者有一半以上来自中国和印度，这两个国家一共有12个特大城市。除了更大，城市也将变得更密集。每天有超过100000个航班从世界各地的机场起飞。正因如此，2009年流感病毒在几周内蔓延至全球，2015年年底在中国首次发现的大肠杆菌耐黏菌素菌株几个月后突然在宾夕法尼亚州出现。航空网络也在改变感染的路径，传统的世界地图呈现的是直线距离，这无法真正让我们看到世界各地是如何联系在一起的，也可能在传染病传播方面误导我们。一旦考虑飞行路线，一些城市可能会比最初看起来的距离更近（或更远）。

未来，医学知识也将更容易在全世界传播。在2016年叙利亚内战期间，英国和加拿大等地经验丰富的外科医生使用网络摄像头指导当地医护人员在战地进行手术。随着增强现实（Augmented Reality，AR）和机器人技术的改进，我们不久就可以远程进行更复杂的手术。全球数据共享也可以助力家庭治疗。患者可以用人工智能分诊软件讨论问题，如果需要的话，患者可以在不离开家的情况下进行身临其境的增强现实技术咨询，而不必设法预约面对面的会见。从核磁共振成像扫描到显微镜载玻片，使用在全球患者数据库中总结出来的模式识别软件进行诊断成为可能。医生可以通过即时比较患者的病情和大量类似病例来判断特定治疗方法的风险。当一种新的传染病病毒出现时——无论是埃博拉病毒还是大肠杆菌——卫生机构可以很快看出它与附近地区暴发的其他疾病的关系，从而确定如何控制它。

这又回到了我们应该对医学的未来乐观还是悲观的问题上。即使我们加强对当前疾病的预防，根除疟疾、脊髓灰质炎、麻疹等各种疾病，其他疾病也可能出现。即使是在遥远的将来，面对耐药细菌，或是我们不断变化的生活方式引起的慢性疾病，我们对人类健康的守护都是有限的。联通的世界也将面临新的健康威胁，以及由此而来的一系列生物、技术和社会挑战。然而，医学的全球化也将产生新的思路和方法，使我们能够直面甚至直接消灭其中一些挑战。互联和协作也终将拯救我们。

基因组和遗传工程

GENOMICS AND GENETIC ENGINEERING

文/阿拉蒂尔·普拉萨德（Aarathi Prasad）

生物学将成为未来100年中的主导学科……

——弗里曼·戴森，1996年

遗传学是对DNA的研究——对我们称之为基因的DNA短片段，以及所有控制它们的物质的研究。基因是我们的遗传单位，是身体的编码文件。它们包含各种指令，即要执行的编码。侧翼基因则是其他编码文件，它们定义了基因应该何时表达以及表达的难易程度。大多数基因编码会被读取并翻译成蛋白质，蛋白质是我们组织和器官的基石。此外，这些编码还会翻译成激素、抗体和细胞中的运输系统，等等。通过这种方式，基因控制了关乎我们身体形态、健康和潜能的重要组成部分。

基因工程即我们所说的对基因的操纵。这种操纵有着悠久的历史。低技术含量的基因操纵（又名选择育种）已经将10000年前看起来像小穗花的玉米果穗变成了多汁的玉米棒，还把狼变成了哈巴狗。最近，我们已经通过实验创造出了可以制造药物的植物，并培育出了含有维生素A的水稻品种，这种维生素对我们的免疫系统和视力至关重要。我们仍然在操纵基因进行治疗、对抗感染，并创造新的能源和可持续食物来源。但是，我们现在的工作方法步入了一个崭新的先进技术领域，其潜力尚未得到充分的发掘。

基因组学是一门搜罗和绘制完整基因数据集的学科。这是一个由遗传学和分子生物学发展而来的信息收集领域，是涉及蛋白质和遗传物质（DNA和RNA）的科学。基因组学试图对人体细胞内生命分子的构成和机制进行编目。十多年前，人类首次读出了构成人类全部DNA序列的化学碱基。它们仅由四个字母A、C、T和G的不同组合表示，这就是我们的基因组。我们所有的遗传物质由包含约20000个基因的30亿个字母拼写而成。按照普通出版物的字体大小，这些字母连续写成的序列可以从伦敦一直排到里约热内卢。

目前，纳入基因组研究的不仅有人类，还有其他四千多种生命，包括细菌和病毒，也包括黑猩猩、鸭嘴兽和日本重楼（其中一种的DNA按质量计比人类多50倍）。但是在这里，累积生命编码目录并不是最终的目的。以基因组学在医学中的应用为例，理想的路径似乎是这样的——

第一，我们必须了解基因组的结构，并掌握使基因发挥作用的所有物质的编目；第二，我们必须努力了解和基因组有关的生物学知识，了解所有指令的意义，明确基因组的哪些部分是指令，哪些不是，不是指令的部分为何如此重要，以至于在进化过程中一直留在基因组中；第三，我们必须了解染色体的图景包含哪些疾病生物学知识，从而解决一些问题。例如，人类的DNA为何能防止或者诱发某些疾病？人类的DNA如何与可能有害的微生物相互作用？我们如何利用这些知识，开发出更智能的靶向药物，提高医疗保健效果？

在最近20年，我们才刚刚获得了解读基因组的基本能力，并开始认识基因操作规范。我们还没有识别人类基因组中所有可以发挥功能的部分，无论它们是否形成基因。（例如，我们DNA的某些部分仅用于确保基因组的稳定或组成正确。）这是遗传研究在未来的重要课题。不过，还有很多东西已经得到了解读。2004年，完整的人类基因组序列发布，第一种全基因组测试方法仅用了两年就上市了。2007—2014年，仅在美国就有50万消费者购买了家庭测试工具，以了解自身基因组中携带的信息。在全球范围内，这一领域的线上和线下销售市场都保持着一定的热度。在接下来的20年里，我们不仅将熟练地解读自己的基因组，还将更深入地挖掘已有记录的遗传信息。曾经受到匿名保护的基因信息越来越容易暴露——无论是好是坏。

而且，当我们不再简单地操纵已经存在于地球生命中的遗传密码时，基因工程的新时代才真正开始。一旦我们读懂了遗传密码，并开始掌握它的语法，我们就有可能主动去编写。未来，我们将尝试设计越来越复杂的DNA，等到这扇窗打开之后，我们在接下来的20年内无疑会看到地球上新生命形式的诞生，我们也可能看到已经灭绝的物种复活。虽然在哲学理念和进化进程上不那么重要，但在生物学之外使用生物学密码将成为我们的日常习惯，渗透我们的工作和生活。毕竟，DNA是一种自我复制的密码，近40亿年来，它以始终一致的方式回应不断变化的环境，在没有人工指令的情况下进行自适应和多样化。当我们了解了基因组，并尝试通过驾驭DNA来化解人工智能目前难以解决的问题（自主学习、被动适应、自我复制），计算机技术和DNA系统的交互方式将彻底改变。

未来，遗传学和基因组学有可能让我们更深入地理解和掌握我们的身体、我们周围的环境，并且以更加个性化的技术赋予我们力量。我们将如何利用这些技术进步？我们将如何利用不断发展的基因和基因组知识？以下就是正在塑造基因新时代的几项科技革命。

基因组检测

就在不久前，即使是分析DNA也意味着要使用专业实验室中的昂贵的大型设备，更不用说对整个基因组进行测序。在2000年，获得人类基因组的序列草图需要耗时15个月，耗资约3亿美元。到了2006年，获得

个人基因组的草图仅需1400万美元。10年之后，这项工作花费降低到了1500美元左右，可以在两天内完成。现在，测序开始摆脱实验室，甚至跳出了遗传学家的手掌心。我们不再需要大型设备，新的测序仪可以放进口袋。这些设备还无法绘出个人的完整基因组，但未来潜力不可小觑。目前，科学家正在研发设备，用于研究重要的特殊基因，并且及时测序。最近的发明可以监测细菌或感染人的病毒毒株基因组数据。从公共卫生的角度讲，这已经为最需要这种设备的地区带来了希望。在非洲西部，这样的便携式测序仪成功地从患者身上识别出了148种埃博拉病毒的基因组。未来，在该领域，人性化的微型基因组科技会争取在数小时内进行诊断，并指导冠状病毒、登革热、埃博拉病毒、基孔肯雅病毒和寨卡病毒等的治疗。这样的科技应用有一天可能会像手机一样出现在每个人的口袋里。

我们甚至可以使用半导体实现形态更小的DNA检测设备。伦敦帝国理工大学的克里斯·图马佐（Chris Toumazou）最近研发出一种可插入U盘的检测用芯片，只需几分钟即可在任何计算机上查看结果。这项技术有意避开人类基因组的全部30亿个化学碱基，专注于每个人身上较独特的那1%，从而创建“生物IP地址”。不同的芯片可以检查不同的人类基因突变，包括一个人对某种疾病的易感性，或者个体代谢某些药物的能力。正如图马佐所说：“未来，医生考察的将不再是你的病史，而是你未来的疾病。”

基因组应用

基因组革命可以更好地保护人类健康，但它的威力远远不止于此。每种生命形式的指令都编码在基因组中。在过去几年中，更智能的新技术已经涌现，并引发了一系列对未来的展望，这些展望很可能还存在于科幻小说的世界中。其中，詹妮弗·杜德纳（Jennifer Doudna）和艾曼纽·卡彭特（Emmanuelle Charpentier）杰出的创新成果最为突出。他们最近研发的基因组工程技术已成为这一领域最先进的技术。这就是CRISPR，它是一种操纵DNA的新系统。它能够更密切地考察特定基因的功能，通过对特定基因的启动、关闭，或者对DNA的精确位置切割，改写间隙中的序列。理论上，这意味着我们可以精确地除去造成患病细胞的缺陷基因，并用“健康”的、正确发挥功能的基因替换它。

这项技术也为基因组编辑之外的新技术提供了可能性。未来，这能帮助我们厘清98%不编码蛋白质DNA的功能，使我们越过基因组的字母表，研究遗传物质的语法和标点符号。这关乎我们自主打开和关闭基因的能力。我们已经开始用光控制引入基因组变化的位置、时间和可逆性。这涉及另一个快速发展的领域，即光遗传学——用光控制细胞。目前，科学家正在实验室里通过这项技术加深对大脑的理解。在接下来的20年中，我们希望该领域能够提供关于一系列疾病的关键信息，这些疾病包括帕金森病、癫痫、阿尔茨海默病、卒中和听力损失等神经退行性疾病，目前这些疾病还没有有效的治疗方法。此外，科学家正在开

发“CRISPR丸”——可依照顾客要求定制的、用于指示耐药细菌自毁的可食用DNA序列。

我们已经看到了许多CRISPR相关技术的应用，从必要的（防止蜂群减少）到琐碎的（宠物狗、迷你猪预订，以及锦鲤颜色定制）。在接下来的几十年中，这项技术还可能创建复杂的生物电路，将细胞转化为生物燃料工厂，例如，以培育耐感染家畜为手段。此外，还有“CRISPR小鸡”计划，CRISPR编辑工具将直接整合到鸟类个体的基因组中。实际用途包括“制药”，参与此计划的鸡就像转基因鸡一样，它们产下的蛋中可以含有解决胆固醇问题的药物。

其他应用还包括灭绝动物半“复活”计划。我们已经开始着手研究编辑大象胚胎，培育像猛犸象一样的北极大象，我们也在着手研究编辑鸽子胚胎，以便重现19世纪因人类过度捕猎而灭绝的候鸽。

遗传学、计算机信息处理技术和生物黑客

能够读懂DNA，我们就很容易看出它作为编码系统与计算机科学有什么相似之处。过去几十年的数字化革命一直是基因组革命的主要推进者，而针对DNA的研究也可以以多种新颖的方式反哺计算机技术。DNA的数据存储形式毫无疑问比我们在过去几十年中看到的所有存储介质都更长久。与软盘或CD-ROM不同，只要地球上有人掌握读取DNA的技术，其中的数据就可以使用。DNA数据存储的另一个优势在于规模。细胞核包含一个人的整个基因组，而细胞核的直径通常为2～10微米。1微米是1米的百万分之一，就连人的一根头发直径也有约75微米。作为一种概念验证，最近我们已经用DNA存储技术进行了文本文件和音频文件存储，内容包括莎士比亚的全部154首十四行诗，以及马丁·路德·金著名演讲《我有一个梦想》的26秒音频剪辑。这项工作是通过电子学和计算机科学中的二进制代码完成的，但是它使用组合方式不同的DNA碱基A、C、G和T来表示位（0和1）。比特是可以在计算机上存储或操作的最小信息单元，以莎士比亚十四行诗的存储为例，有520万比特的信息编码到DNA中。

抛开数据存储不算，DNA计算处理技术的前景本身就是迷人而出人意料的。它最早用于解决一系列计算机科学家感兴趣的难题，其焦点是我们越发依赖的电子计算机、智能手机和平板电脑，它们需要越来越小化的组件，这关乎成本和技术。然而，电子设备的小型化趋势即将达到极限。但是，对于DNA计算机来说，单个分子是输入数据，而其他生物分子，如蛋白质，可以作为处理器。与按顺序处理数据且耗时较长的传统计算技术不同，DNA计算机更适合并行处理信息，这大大加快了处理速度。试管中或玻片上可以自由活动的DNA或RNA本身就能进行计算，比如，含金玻片可以以电路板的形式进行排列。创建一组编码计算问题解决方案的DNA分子可以在这个表面上合成并保存。

DNA计算处理技术也可应用于传统计算机望尘莫及的空间和尺度，比如细胞之内，或极其薄的合成材料中。由此微小的生物计算机将有可能进入细胞，识别患病组织，选择性地执行自毁序列，或者重新编码细胞受损的DNA。例如，我们也许可以通过这种方式为癌细胞重新编码，以避免它们增殖成肿瘤，我们也有可能让干细胞长成替代器官。同时，生物计算机已经显示出控制生物活性治疗分子的能力，一些药物的给药过程也许会因此受益。

基于DNA的分子电路也有一些令人印象深刻的例子，其中包括为编码井字棋游戏（与人类对手进行交互式竞争）而创建的电路、计算平方根的电路，以及表现出类脑自主行为的类神经网络。然而，到目前为止，计算机数字逻辑的模拟一直难以捉摸、令人沮丧。而且，DNA的计算能力在执行任何算法方面都比不上现有的硅计算机。

尽管如此，该领域仍然在开辟令人兴奋的生物学和生物医学应用。在未来的几十年中，DNA计算技术将创造更好的DNA新设备，以生物传感器的形式参与诊断、纳米制造，以及人体细胞的编程控制。它还将在“智能药物”的开发和传送过程中发挥作用，将“智能药物”输送到人体所需的部位，这意味着感知和分析各种生理学诱因，并进行逻辑运算以释放药物或调节基因表达方式的物质。而且，除了更智能的生活之外，DNA和计算技术的交融也可以使我们更接近自然演化的真相，以及生命起源的秘密。

与此同时，正如曾经仅供专家使用的大型计算机机柜演变成为可供所有人使用的便携式设备一样，人们预测遗传学将越来越多地被传统实验室以外的人在更多个人空间中使用。谁应用基因科学和基因组学，以及如何和何时使用，已经发生了重大转变，这一领域将变得更加“大众化”。

这些变化带来了很多机遇和挑战。医生和患者都在迅速接受基因组革命带来的个性化选择，而个性化医疗已经在各个领域得到应用——从调整药物剂量到指导白血病、艾滋病和结肠直肠癌的最佳治疗途径。那些没有生病，但仍然有兴趣探索未来健康图景的人会越来越经常地使用基因技术。许多人现在正在使用可以在线上或线下购买的工具包和服务，通过直接面向消费者的遗传血统检测来查询自己的基因组。欧特克研究员安德鲁·赫塞尔（Andrew Hessel）参与的项目涉及工程纳米粒子、DNA合成新技术和人类基因组图谱绘制，他说，随着我们走向未来，DNA测序的商业模式正在发生转变。已经有一些公司愿意免费为个人测序，随后出售分析结果或其他服务。另外一些公司会付钱给合适的人测序，因为他们有一些有价值的特征，数据挖掘者值得花时间筛选他们的DNA密码。如果可以找到理想特征（比如，不掉发，头发不发白，不多毛，不需要大量睡眠，在晚年看起来依然年轻，视力更佳或夜视力更佳）的遗传基础那会怎么样呢？研究具有这些特质的人的基因组，我们就有希望找到传递这些特征的药物。

但是，为了收集遗传信息，我们毫无疑问必须送交自己的DNA样本，我们要把自己基因组的秘密封装在试管中，寄送到实验室，等待完成读取，并通过互联网获得解读结果。这可能听起来并没有害处——尽管在自己身上检测出维京血统或者发现自己是埃及艳后失散已久的后代让你将信将疑。不过，发展到一定阶段，对我们今天能够理解的遗传学数据的有限解读会在未来十年带来潜在的风险。基因组不仅能够唯一地标识其所有者，它还包含了家族血脉和易患疾病的信息，这些疾病也包括精神障碍，这对我们的隐私有着严重的影响。

伦敦大学学院计算机安全和隐私专家埃米利亚诺·德·克里斯托法罗（Emiliano de Cristofaro）告诉我们，即使是最近创建公共数据集这种“为了大家好”的公共卫生举措，也要求患者和捐赠者基本上放弃他们的隐私。他说，基因组匿名化（除去标识符以隐藏基因组所有者身份）几乎不起作用。举个例子，一个研究小组最近仅用系谱学网站提供的信息就找出了基因组的主人。这甚至还不是具有完整基因组序列数据的站点，这里能查到的仅仅是这些人基因组中不连贯的小片段。

德·克里斯托法罗警告我们，在未来几年，计算科学的发展引发的DNA数据安全问题只是此类问题中的一个。事实上，还有一部分基因组的功能我们目前还不了解，公开这部分基因组似乎没有风险，但是随着我们更深入地了解基因组，这些DNA数据可能对它们的所有者不利。DNA数据可以迅速武器化并不是一个牵强附会的想法。有人提出，了解目标基因组的特性是创造个性化生物武器的重要基础，这种生物武器可以不留任何痕迹地将目标拿下。但在更世俗的层面上，德·克里斯托法罗下面这段话更加值得我们思考。

如果我们发现某个突变与精神障碍有关，那会发生什么？数据一旦公开就无法收回了。我们不要忘记，基因组数据会带来前所未有的安全挑战，因为基因组的敏感性不会随着时间的推移而降低，并且掌握了某人基因组的信息也就意味着掌握了其近亲属的信息。毕竟，如果计算机密码泄露，你可以重置它，但是你不可能重置自己的基因组。

我们可以想象一个较为理想的未来，民主发展遵循近十年来既定的道路，许多大城市会涌现社区实验室，没有接受过科学训练的人在此推进着触手可及的低成本技术。普通人也可以研究各种各样的项目，从生产廉价的胰岛素到摆弄粮食作物。遗传科学的进步也为休闲提供了空间：人们可以编印果酱的基因序列条形码，也可以让细菌像夜光灯一样在黑暗中发光。

安德鲁·赫塞尔认为，不仅如此，未来生物技术还将在家庭中普及。正如我们现在拥有个人电脑、网络、云一样，未来的人将在家中看到易于使用的生物技术设备，如监测口腔微生物的牙刷。

虽然遗传学带来的技术变革已经开始取得成果，但其他的一些方面可能在一段时间内不会走进我们的生活，而且它们的出现可能不会符合

大多数人的期望。但是，正如赫塞尔所说，我们可以肯定的是，DNA技术会变得更好、更快、更便宜。这些技术非常重要，因为它们将使我们能够设计各种生物。他说：“这种技术的应用和快速发展是不可避免的。我们想阻止也无法阻止，正如计算机（终将普及）一样。”

合成生物学

SYNTHETIC BIOLOGY

文/亚当·拉瑟福德（Adam Rutherford）

我们可能会认为花314美元买一条领带太贵，不过话说回来，这种特别的领带可是用蜘蛛丝编织而成的。这听起来确实不可思议，或许能在某种程度上证明花这么多钱是合理的。蜘蛛丝是一种神奇的材料，根据物种和环境的不同，这种蛋白质能够以多种形态发挥功能，用于吊网，作茧密封猎物，或保护蜘蛛卵。每种蛛丝的机械特性、弹性和物理特性都超过人类能够制造的水平。相同重量的拖丝蛋白比钢更结实。每种蛛丝都是通过吐丝器从蜘蛛腹部挤出来的，吐丝器是一组高度复杂的体内接头，可根据所需的蛛网类型排列成丝蛋白短纤维。

虽然我们很喜欢收获蜘蛛丝，并开发其卓越的物理特性，但是众所周知，蜘蛛很难养殖。多数蜘蛛都难以适应生产大量纤维所需的工业化农业生产过程。蜘蛛基本上是独居者，与其他蜘蛛一起饲养时倾向于同类相食。因此，这种领带要价如此之高的第二个原因在于，它由跟蜘蛛或吐丝器并没有什么关系的真实的蜘蛛丝编织而成。这种丝是在酵母中培养和发酵而成的。

欢迎来到合成生物学的奇妙世界。这个标题无疑有点矛盾：生物学研究的是大自然，因此不可能有人工合成的份儿。这个难题意味着一项核心技术，这项技术不仅会深刻地影响（甚至主导）我们服装的未来，而且还将影响医学、农业、药物设计、能源生产甚至太空探索。这种领带是合成生物学公司博尔特丝织品公司（Bolt Threads）生产的第一款商品。从某种意义上说，这是一个里程碑，却还算不上是真正的大众畅销商品——博尔特首批只制造了50条蜘蛛丝蛋白质领带，它们是时尚的蓝色织物，而且相当昂贵。博尔特是一家致力于制造服装材料的公司，该公司绕过了饲养和耕种动植物等低效生物并收获棉花、羊毛或丝绸等材料的传统生产形式。一万多年来，我们一直在“设计”动物和植物，这样它们就能生产出供我们使用的产品。但是农业一直局限于有性繁殖缓慢、烦琐的过程，并且局限的核心往往在于，我们必须通过同一物种的生物体进行繁殖。运用合成生物学，我们现在完全可以绕过性和繁殖，甚至可以将完全不能交配，已经在进化树上分离了数亿年的有机体——蜘蛛和酵母——组合在一起。合成生物学家试图提取自然的源代码并将其重新设计成更高效的生物工厂。

自然的源代码就是DNA。蜘蛛丝蛋白由几亿年来只存在于蜘蛛中的基因编码而成。几十年前，我们开始准确而快速地提取和表征基因，并思考如何将它们重新插入生物体中，有时我们想将基因插入原物种，有

时我们想把它插入截然不同的物种。我们可能让基因保持原样，以便观察它的作用；我们也可能进行修改，甚至故意让它残缺，观察某些部分被破坏时会发生什么，进而测试其自然功能。这就是基因工程，这个领域存在的基础在于生物学源代码的通用性——地球上的所有生物体都在同一张系谱图上，这是一个无比庞大的网络，根据查尔斯·达尔文的自然选择理论，它已经蓬勃发展了大约40亿年。这意味着所有生物都是由DNA编码的。这是一张看似简单的字母表，仅由四个化学字母组成，它们却能串成表达基因的语言。基因的语言可以翻译成由氨基酸组成的字。所有生物使用的氨基酸只有21种，它们连在一起形成蛋白质。每一种既有的蛋白质都是用这种方式形成的，所有的生命都是由蛋白质构成的。

20世纪70年代中期，基因工程诞生，这意味着，如果操作得当，细胞或寄主并不在意DNA来自哪里，只要能够读取就行。只能由某一个物种产生，给出指令制造蛋白质，并告诉蛋白质做什么的基因，可以被写入另一个完全不同的物种的DNA。

几年前，甲壳虫乐队首次将采样技术应用于音乐创作。在录制1967年发行的《比伯军曹寂寞芳心俱乐部乐队》（*Sgt Pepper's Lonely Hearts Club Band*）专辑曲目《为了凯特先生好》（*Being for the Benefit of Mr Kite*）时，乔治·马丁和保罗·麦卡特尼拿来维多利亚时代马戏乐器（被称为蒸汽机风琴）的录音带，并剪切成许多短条。据说，他们将这些短条随便一扔，从地板上随机挑选几个，并插入唱片中。音符是用相同的“语言”编写的，因此，通过仔细地调整音调和节奏，这些片段完美地融入了歌曲。这是一个有历史意义的创举。从那时起，这种采样在流行音乐中变得非常普遍，并且催生了各种流派，其中说唱成了史上最赚钱的音乐形式。

1973年，斯坦福大学一位名叫保罗·伯格（Paul Berg）的科学家领导了一项团队工作，将一个基因从一种病毒转到了另一种病毒。这种生物取样行为可以被视为现代生物学诞生的标志，这也是生物技术主导其他技术的基础。现在，没有哪个关乎生命的领域不依赖这些技术。识别导致疾病的缺陷基因，以及在人类基因组计划中鉴定我们所有的基因，这些完全依赖于我们提取基因并放入细菌，完成操纵、表征和辨别的能力。我自己的（发育遗传学）研究主要是从一个生物体中获取基因并插入另一个生物体，我们对后者了解更多，更容易看到基因如何表达。我们获取人类的基因并放入细菌中，对这些密码摆弄一番，然后将它们拼接到小鼠中。在几十年后，以20世纪80年代为起点，重新合成生物的行为开始变得正常化。

随着20世纪过去21世纪来到，遗传学、基因工程和分子生物学从幼年进入童年。在那些日子里，人类基因组计划不断获得进展，我非常兴奋。身处一场科学革命之中时，所有相关领域的科学家都会感觉到干劲十足。但现在回想起来，那时的我们都太笨拙，效率太低，这主要是因为每次实验时都要寻找基础的DNA操作方法。每次想要采样时，我们都

在剪切蒸汽机风琴的录音带。这是一个完全定制而成的、重新合成的世界。

其实，这就是大多数新技术的来历。科学家通过手忙脚乱的尝试发明了这些操作，然后使它们变得简洁，留下标准并广泛传播，让每个人都可以使用。这些方法很快就变得更简单，接着就成为常规的操作。音乐采样现在成了一种游戏，甚至可以在智能手机上玩。我现在描述的技术对50年前的人来说是难以想象的。这是一种我几乎完全不了解的技术，这种技术的表现在很大程度上可以预见，而且基于简单的电子学原理和材料属性。我按键的动作使电子向下通过导线、电路、逻辑闸、晶体管，进入发光二极管，这种发光二极管如此复杂，我无法理解它是如何真正起作用的。零件的商品化促进了电子学的繁荣。这些组件已经标准化。想要使用二极管的人不必发明二极管。我可以购买二极管，并与其他组件结合在一起，然后就能充分了解它的性能。

配件变得更小，设计更复杂的电路就会变得更容易。如今，基于晶体管的电子设备几乎进入了所有人生活的各方面。

合成生物学的创始人也认识到了这一点。在美国的斯坦福大学和麻省理工学院，电气工程师和数学家发现，遗传学就像编码的电子线路，可以进行编写和重写，但遗传学家花了一半时间用来改造他们的电路。如果基因工程的各个部件可以像电子元件一样标准化，那么这项技术工业化的进展速度可能呈指数级提升。

这正是他们所做的事情。生物零件基金会（The BioBricks Foundation）成立于2006年，旨在创建一个开放的DNA标准部件存储库，这些标准部件经过精心整理，可以像乐高积木一样组合和拼接在一起。这不是比喻，基因和基因开关被提取成为DNA链，每个末端都已成形，能以正确的生物学方向附着到另一段DNA链上。每一个基因片段都可以从储存库中调出，放在一小张吸墨纸上寄送到世界各地。通过添加某种溶液，DNA可以漂下来，连接下一个组件，就像多米诺骨牌一样。通过这样一个简单的举动，你可以完成前所未有的基因工程操作，这对于现代科学来说也是不可思议的。

科幻小说界的领袖最擅长预测未来技术，但他们都没有预见这一点。进化凭借其无法效仿的40亿年的错误和试验系统，为构建生命形式提供了难以想象的资源：随着环境在周围发生变化，各种各样的基因每个都经过了选择，以优化生物体内的生存状况。通过合成生物学，我们发明了一种系统，我们取得进化的组件，并将它们重新组合起来，这并不是为了存活下去，我们有自己的目的。

合成生物学有很多种形式，有些研究人员不仅为特定的目的而改写密码，还用自然界中不存在的字母，或者用从未存在过的、修改后的DNA再造DNA语言。其他一些人则专注于研究如何将DNA作为数据存储设备——毕竟，说到底，这正是DNA在生命过程中的作用。基因是信

息，DNA作为一种数据格式非常稳定。我们可以恢复已经死亡数万年甚至数十万年的人和生物体的基因组。而这是DNA，我们永远不会有不想再研究它的时候。回到数字硬件世界，数据在消减，而一种格式过时只需要数年而不是数十年。你还记得5英寸软盘吗？你还记得老式录像带吗？世界各地的几个项目已经成功地将视频、莎士比亚的十四行诗、图书和其他内容的数据编码成了DNA，目前，DNA已成为已知最密集的数字存储形式，它在这方面比蓝光光碟高出几个数量级。作为数字存储器，DNA写入速度慢，读取速度也慢，这意味着它只能用于长期存档。但是在未来，我们也许会使用DNA格式化的驱动器运行计算机。

合成生物学诞生后的第一个十年就迸发了这些创意，这已经非同寻常，这一领域创造未来的潜力也是前所未有的。在这里，创意和技术的广度令人惊心动魄，但这一领域科学家最大的动力在于，他们想在未来设计出能形成产品的遗传电路，这是通过其他领域的技术难以实现的。

应对历史上最大的单一死因是合成生物学运动的一个核心。每年，全世界有2亿至5亿疟疾感染病例，约有40万人因此死亡，其中大多数是15岁以下的儿童。纵观整个人类历史，这种不变的病魔夺去的生命比任何其他单一病因都要多。多年的医疗行动使其得以暂时缓解，但是不受管制地过度使用药物导致疟原虫发生变化，病症由此演化，对特定药物产生耐药性。近年来，一种名为青蒿素的化学物质已成为治疗疟疾的最有效药物。依照传统的方法，人们要从亚洲的青蒿植物中提取青蒿素。但是，与许多传统的农产品一样，它受到了经济兴衰周期的影响，市场价格在过去几年里大幅波动。在21世纪的最初几年，旧金山一家名为阿米瑞斯（Amyris）的合成生物公司致力于开发一种可以在酵母中培养的柴油，他们的一位研究人员注意到，一种处于曲折的分子路径中的产品正是青蒿素的前体。因此，他们开始改进遗传电路，以便在酵母细胞中大量生产青蒿素，并提取出来，以此作为药物的新来源。比尔和梅琳达·盖茨基金会认为，这是在传统农业的经济枷锁之外对疟疾进行大规模治疗的潜在策略，基金会已经投入数百万美元的资金，同时授权赛诺菲制药公司以明显较低的价格将其推向市场。

从早期到现在，合成生物学家一直在研发如何将细胞作为传感器使用。生命机制是非常敏感的，视网膜中的光感受器就能够探测到单个光子。今天，细胞已被重新编程，以检测各种环境信号，从超市中出售的变质包装肉类，到石油污染物，再到人体内的感染因子，都是检测对象。

而且，合成生物学并不是只能在地球上应用。美国国家航空航天局（NASA）对这一学科非常感兴趣，并投资开发了DNA重新编程衍生出来的技术，这主要是因为细胞很小，几乎没有什么重量。太空探索最大的成本与重量有关。据估计，打破重力的束缚，将1千克物资从地球送到太空大约需要花费30000美元。如果真的要把人送到其他星球上，那么我们必须考虑两个关键障碍。首先，太空环境严酷，我们还没有进化到能在地球大气层的保护之外生存。太空船将暴露在大量的宇宙射线和

太阳耀斑引起的辐射中，由此接受的辐射量十分惊人。在往返火星的模拟旅行中，我们发现，宇航员会患上不育症和白内障，并有可能患上一系列癌性肿瘤。对付这些致命射线的最佳方法是使用厚金属罩，其质量很大，因此成本过高。位于加利福尼亚州艾姆斯的NASA研究人员一直在思考合成生物学能否带来两全其美的方案，他们一直致力于研究辐射之下可以分泌细胞因子的细菌。细胞因子是人体对辐射引起的DNA损伤的自然反应，因此能产生其自身细胞因子的合成细菌可治愈这种损伤。

NASA开启合成生物学计划的第二个原因是，一旦宇航员到达另一个星球，他们就需要相应的住所、氧气和食物。合成生物学项目使用生物零件在细胞中生成电路，而这些细胞能制造氧气、食物甚至砖块——它们可以分泌凝结分子，能够在模仿火星风化层的沙子中形成砖块。这种项目需要的原料包括一试管的细胞、一些水和一些火星沙。这些原料只有一种需要从地球搬运过去。

合成生物学梦想带来的希望和热情促进了这种创造力。这是一个洋溢着青春活力的领域。任何人都可以构建这些基因电路——唯一的限制就是你的想象力。很长一段时间以来，问题在于这些梦想实际上很少能成真。依照理论设计的电路并不总像预期的那样在活细胞内起作用。原本应该很清晰的数字输出，经常被系统中的噪声所干扰。无论是化学传感器、药物还是燃料，输出端口都有点不稳。NASA的宇航员防护设备还需要几十年才会投入使用，阿米瑞斯尝试制造清洁生物柴油，却证明了这项工作无法规模化，而且他们无法发展出商业上切实可行的体量。青蒿素几年来一直准备大规模地进入市场，却从未完全成功。黑市上已经有了青蒿素，但由于其用法没有遵循世界卫生组织用药指南，这已经让疟疾从源头出现了一点耐药性。用药指南指出，服用青蒿素只能作为综合疗法的一部分。

然而，合成生物学的希望是很真切的。在21世纪的头十年刚出现时，它明显让人们兴奋了起来。一段时间内，相关的报道和讨论的热度非凡。但就像许多新兴技术一样，它并没有完全达到人们的预期。我相信，我们现在已经经过了炒作时期，来到了更加现实和稳定的发展时代，我们很快将看到合成生物学实际可用的产品，看到这些产品解决现实世界的问题。DNA已被重新设计为软件——更恰当地说，是湿件（wetware）。除了关注DNA编程之外，湿件工程师现在还在为即将上架的产品考虑漏洞修复。博尔特公司的领带自然是一种噱头，但这也展示了我们制造产品的技术如何发生巨变。在科学领域，革命往往是缓慢的、渐进式的。几万年来，我们一直在种植、收获和提炼建造世界的材料。很快，相同的东西将直接生长在活细胞内，我们编程细胞内的电路，让自然重新发生混合，产生材料。

超人类主义

TRANSHUMANISM

文/马克·沃克（Mark Walker）

超人类主义者认为，我们应该使用先进的技术，如药理学、基因工程、控制论和纳米技术，从根本上提升人类。换句话说，我们应该尝试创造新型的人类——有时也被称为“后人类”。与我们相比，他们明显更优秀。请想象这样一个未来世界：其中居住着一种新的后人类物种，他们更快乐、更正直、更聪明，而且寿命可以长达几个世纪，而不只有几十年。这就是超人类主义者的想象，也是他们努力追求的前景。

人类可以更幸福

我们知道快乐很重要。我们完全理解为快乐放弃名望、权力或金钱的人，以及常说自己只想让孩子快乐的父母。

既然致力于创造更美好的人生，超人类主义者主张使用科学技术从根本上提升幸福感也不足为奇。

我们现在知道，幸福（定义为积极情绪和对生活大致满意）的遗传因素与控制身高的遗传因素几乎同样重要。当然，这种基因发挥作用的过程很复杂，基因不是唯一的决定性因素，大多数人类特征是由基因和环境因素综合作用而形成的。但是，我们都认识比大多数人更幸福的那些人。这些人的步伐似乎格外有活力，他们能从重大的失望中重新振作起来。这些“特别擅长快乐的人”有着“快乐基因”——与快乐的性格相关联的基因序列，这些基因序列已被科学家识别和定位。随着生物科学的成熟，使用基因工程技术有可能创造出比现在的普通人更幸福的后代。我们至少已经实际拥有了着手创造更快乐后代的技术。创造“试管婴儿”通常需要在植入母体之前对实验室中培育的胚胎进行基因检测。技术人员通常会检测疾病的遗传标记，有时也测试儿童的性别，不过，从原理上讲，易于获得幸福的遗传标记也可以检测出来，甚至接受筛选。

但我们不必等待基因工程和遗传选择来使幸福的人随处可见。即使基因没有改变，人也可以从根本上增进幸福感。我自己提出了“快乐人药丸”，试图将增进快乐的药剂做成药丸，以帮助因为没有撞上基因大运而缺失幸福感的人（也就是绝大多数人）。与目前的药物（比如安定和迷幻药）不同，这些药丸可以提供自然的愉快体验，而不会损害我们的认知能力。如果获得了社会工作者的支持，我们很有可能在十年内研制出这样的药丸。这个项目耗时约十年，每年将花费大约10亿美元。与全球

经济规模相比，这是一笔很小的金额，但回报将是巨大的。我们也可以像最幸福的人那样享受快乐，我们的步伐也可以带着同样的活力。这还会产生不可思议的连锁反应，让我们越来越快乐。快乐的人往往更合群，更容易交友，更容易取得好的学业成绩，更容易拥有好的婚姻，更容易从同事和老板那里得到更高的评价……

人类可以更高尚

为使人类品行更加端正，我们付出了巨大的努力。我们在童年时期都要频繁地接受品德教育——打人不对，撒谎不好，要友善待人，与人分享。除此之外，我们还有强调种族主义罪恶的公共教育计划，还有摇滚明星引导人们关注不幸者的困境，这些是针对成年人的公德教育。

研究“遗传美德”和“道德提升”的超人类主义者建议，在使人更加道德时，环境方面的工作应该与生物学方面的工作相匹配。该建议基于两个基本理念：人类行为和人格特质具有遗传组分，而道德涉及行为特征和人格特征。

已经成为研究对象的行为特征或人格特征似乎都具有一些遗传因素，我们可以有把握地预测，正直的行为也有遗传因素。事实上，如果这种遗传不存在，那才叫不可思议。我们甚至可以在其他物种中看到大量关乎品德的行为：母鼠会照顾幼崽，猿类有时会以一种我们只能描述为公正的方式分配食物。

有关遗传性美德的提议旨在为我们的后代提供更多有利于产生美德的生物构件，同时避免产生恶习的生物组分。与幸福一样，这也关乎生物学变化，可以是基因工程、胚胎选择或高级药理学的结果。然而，对于遗传决定论的警告同样适用于此：即使我们创造出的后代携带着与道德行为相关的基因，我们也并不能保证他们真的会更正直。充其量，这样的程序只会增加他们正直的可能性。基因并非一切。

人类可以更长寿

人类延长寿命的愿望可能与人类历史一样古老，但人们在实现这一目标方面却没有取得多大进展。在撰写本文时，法国女子雅娜·卡尔芒（Jeanne Calment）仍然保持着人类最长寿命的纪录：122岁（1875—1997）。医学在延长人类寿命上一直没有起太大作用，我们有充分的证据表明，有史以来一直有少数人能活100多岁。通过降低婴儿死亡率，医学在提高人类平均寿命方面发挥了很大的作用。

从根本上延长寿命，就是利用科学技术突破稍长于100岁的生物学极限，使人类或后人类可以生活数百年甚至数千年。实现这一点的一种方法是简单地更换老化的器官，就像我的邻居通过更换磨损部件来让旧卡车保持运转一样。普通汽车的使用寿命大约是八年，但我的邻居拥有

一辆完美的卡车，能达到该使用年限的五倍。从理论上讲，只要（比如，使用先进的干细胞技术）不断修复和替换老化的细胞和器官，我们就可以使人体无限期地运转下去。科学家已经证明，我们有可能使用患者的干细胞，在实验室的工作台上培养出新的器官，比如膀胱。这个方法实际上就是“剪切粘贴”。例如，移除旧的膀胱，用实验室中培养的器官替换。我们甚至可能不必这样做。在临床试验中，干细胞已用于修复心脏病发作期间遭受的心肌损伤。

逆转衰老和死亡的部分困难在于这些现象牵涉的因素众多。SENS（Strategies for Engineered Negligible Senescence Research，人工操控可忽略衰老策略研究）基金会是一个致力于推动人类寿命延长的非营利组织，基金会已经确认了七种引起衰老的因素（细胞萎缩、细胞癌变、线粒体突变、抗凋亡细胞、细胞外基质硬化、细胞外聚集物和细胞间聚集物）。每种因素都需要专门的生物医学或工程学解决方案。尽管如此，正如一些举世瞩目的技术已经证明了动物的寿命可以延长，延长人类寿命的研究也正在不断取得进步。科学和技术将使我们能够从根本上延长自己的寿命。最近，科学家开发了一种能够移除某类旧细胞（衰老细胞）的细胞“自毁开关”，以此将老鼠的寿命延长了25%。这些老鼠不仅寿命更长，而且更健康，与年龄相关的疾病也更少。

到目前为止，这里所描述的技术对灾难性伤害都没有什么帮助。当一架钢琴从三层楼高的地方掉下来砸在你头上时，世界上所有的干细胞技术都无法帮助你。但是，针对这些意外事件，超人类主义者也设想了修复技术。虽然只是前瞻性的技术，但这些技术也许能在21世纪实现。实际上，这个想法就是创建一个备份：比如，扫描大脑并在微观水平进行记录，然后用数据重建一个新的大脑。该提议的另一个版本是，由一小队分子大小的纳米机器人记录下大脑的分子结构。万一主人发生创伤性损伤，这些纳米机器人就可以被激活，修复被钢琴砸伤的大脑，或者基于事先保存的蓝本创造一个新的大脑。

还有一种可能，那就是将大脑的信息上传到计算机平台。实际上，这就像是将你的心智从生物学湿件（大脑）转移到了计算机硬件上。这引发了棘手的形而上学问题——在这次移动中，活下来的是否真的是“你”？这是否只是对你进行的复制？超人类主义者和哲学家在这个问题上存在严重的分歧。我支持那些认为我们能够在这种转移中活下来的人。实际上，我甚至认为一个人可以存在多个不同的自我。如果你在从生物平台转移到计算机平台的过程中存活了下来，那么你为什么不能上传到多台计算机呢？通过这种方式，人有可能实现永生，或者至少接近永生。

人类可以更聪明

众所周知，脑部大小和智力之间存在相关性。（实际上，对于许多物种来说，讨论智商的时候也必须考虑体重，但我们在这里暂且忽略这

一点。）我们的大脑容量几乎是黑猩猩的三倍，尽管从遗传的角度看，我们非常相似——人类和黑猩猩有96%～98%的基因组是一样的。人类基因组由大约20000个基因组成，这意味着我们有别于黑猩猩的基因只有不到1000个，可能只有400个。利用现有的基因技术，我们可以尝试创造一种后人类物种。让我们把这个物种称作“大头智人”，其脑容量是今天人类的2～3倍。就技术而言，这实际上相当简单。有一些专门的基因（同源框基因）控制着身体不同部位的大小。在人类受精卵发育的过程中，通过增加控制大脑大小的基因的表达，我们大体上有可能创造出具有大得多的大脑的生物。使用这些同源框基因的不同组合，我们可以促进大脑特定部位的生长。例如，大脑新皮层与较高的认知功能相关联，因此，如果要提高智力，那么我们也许能操控该区域发育的同源框基因，尝试增大这一部分大脑。

但是，“我们可以尝试这样做”绝不等于“我们应该这样做”。我们并不确信这种实验能够成功地创造出后人类智能物种：该物种比我们聪明得多，一如我们比猿类聪明得多。但我们也没有理由认为这样的实验会失败。这就是我们进行科学实验的目的——去发现真相。但是今天——举个例子——当我们在植物上应用基因技术时，大多数实验的进展都无法令人满意。将实验失败的植物材料扔进堆肥箱是一回事，处理实验失败的人类受精卵或婴儿是另一回事。不过，我们已经拥有了这样的科学和技术：借助一系列实验过程，我们今天就可以开始创造大头智人。值得庆幸的是，很少有科学家为了进行这种实验而不顾安全、伦理和道德。为了避免让这种有争议的研究与优生学等名声扫地的理念联系起来，整个社会需要审慎地讨论和思考此类问题。

还有一些不那么激进的方法，也可以用来尝试提高人的认知能力。一些研究表明，大约1/3的大学生利用莫达非尼（Modafinil）、阿得拉（Adderall）等促智药物的增效作用提高学习成绩。通过创建脑—机接口，科学家在人类心智的“人体电子化”方面也已经有了一些初步的实验。通过使用再生技术制造大量的新脑细胞，成年人也可能增加脑容量。（成年人的大脑往往只产生相对较少的新细胞。）从针对阿尔茨海默病患者的实验中我们了解到，胎儿的神经组织可以与成人神经组织相结合并顺利发挥作用。所以，这种技术为我们创造大头智人提供了潜在的不同途径。我们可以继续增加测试对象的新脑细胞（并增加其颅骨大小），看看是否有可能从根本上增进智力。

超人类主义的用意

在思考超人类主义的用意时，我们要讨论的关键问题不是超人类主义理想实现的可能性有多大，而是超人类主义在道德上是否可取。思考关于未来的道德主张时，我们要关注的是未来应该是什么样的，而不是它能够是什么样的。

虽然超人类主义声称从根本上优化人类是一个有道德价值的目标，

但这并不意味着超人类主义者认为每个人——尤其是反对超人类主义的人——都应该从根本上得到优化。我们认为获得学位是一个有价值的目标，但我们并不要求每个人必须去上大学。这不仅会侵犯个人自由，还可能适得其反。超人类主义者通常认为强迫成年人做某事是不正当的，即使我们认为这对他们非常有益。

这种反家长作风的另一面是，超人类主义者支持“生物学自主”。在某种程度上，生物学自主已经得到了认可：人们被允许通过激光眼科手术和各种整容手术（如隆胸手术）改变自己的生物学特性。超人类主义者认为，人类从根本上的优化是（或者应当是）在这种普遍的生物自主下进行的——我们会在自己认为合适的情况下打理身体。实际上，我们可以看到，生物自主与许多现代自由主义国家所认可的道德自由密切相关。限制智力或幸福的提高会限制我们的道德心，我们会处在难以感受到快乐的心理状态中，思维也会受到局限。

基于生物优化和文化改进之间的类比，超人类主义者经常把他们设想的人类改造归为一种“无辜的伴生物”——要记住，几千年前，人类才刚刚发明了高效的写作形式，并借此将信息存储在书面作品中。因为在人脑之外创建了辅助存储空间，书写极大地提高了人类智能和追忆信息的能力。我们倾向于认为这种文化改进是非常好的事情，以此类推，我们也应该对生物优化持有同样的看法。

在支持优化时，许多超人类主义者的论证都集中在特定类型优化的积极方面。如上所述，提升幸福的权利或义务与人们对幸福的普遍渴望有关。增强美德的权利或义务则关乎改善生活，让世界更美好。增加智力是为了发现宇宙真相，认清我们在宇宙中的位置。延长寿命则是为了拥有更加丰富而充实的生活。

反对者的论点

直到20世纪90年代后期，对超人类主义的反对声几乎都在说超人类主义所描绘的未来是不可能的，而不是不可取的。技术可以从根本上优化人类的观点被批评（讽刺）为就像科幻小说。1996年，第一只克隆哺乳动物多莉羊诞生，形势开始发生变化。超人类主义的批评者开始不情愿地承认，超人类主义者的某些提议或许在技术上具有可行性，此后，他们的批评开始关注其可取性或道德正确性。

莱昂·卡斯（Leon Kass）曾在小布什设立的美国总统生物伦理委员会担任主席，他表示，超人类主义是一种会导致自毁的狂妄。卡斯认为，努力和奉献与人类最深切的愿望和目的紧密相连。通过超人类主义达到目标，一切都变成了技术问题，个人的努力就没有意义了。麦哲伦在1521年前后环游了世界，这是人类精神的令人钦佩的胜利。今天，我们可以通过购买机票重走麦哲伦的航线，但是这样的旅程很难被描述为人类精神的胜利。然而，卡斯的反对声是否值得关注，取决于下面这种

说法究竟是否合理——如果在生物学上改进人，我们将无法找到挑战自己的新目标。

弗朗西斯·福山（Francis Fukuyama）担心，超人类主义者会破坏现代政治的平等基础：我们有着共同的人性，这种共性是政治稳定性和合法性的基础。福山煞有介事地提出过一个著名的问题：“一旦我们真的能够培育出背负马鞍的人，以及穿靴子戴马刺的人，他们的政治权利会发生什么变化？”一个回答是，我们拥有技术，可以创造背上背着鞍的、屈从的人，但这不一定意味着我们应该甚至一定会创造这样的生物。事实上，我们担心这一结果的原因在于，我们知道在整个人类历史中，总有人在剥削并奴役其他人。但是，提出遗传美德的超人类主义提供了摆脱而不是延续这种趋势的希望。

新西兰哲学家尼古拉斯·阿加（Nicholas Agar）对超人类主义提出了一种在哲学层面上较为复杂的批判。假设人们使用先进技术提高了宠物狗可可（Coco）的认知能力，可可的大脑被放大到人脑大小，它也有了支持语言功能的神经结构。它的嘴、舌头和咽喉被改进，可以发声，它的前爪得到改良，有了对生拇指和赖以控制精细运动的手指。因此，它可以熟练地打字、穿针，等等。可可不断开发新获得的语言、认知和行为能力，它开始上小学，不久就毕业去了高中和大学。过去的生活对它来说似乎毫无意义：想到在街区附近散步或嗅闻灯柱时，它不再欣喜若狂。它不再满足于独自躺在床上休息什么的。当我们审视可可的优化时，这个过程似乎更适合被叫作可可的摧毁。现在的可可几乎完全没有过去的担忧、信念和愿望。我们对它的改造太过彻底，它不再是原来的那个可可。实际上，阿加的论点是，超人类主义不会优化人类，反而会导致人类消失。反对超人类主义的这一论点让人想起亚里士多德的观点：一个人可以祝朋友得到最好的东西，但不可以祝朋友成为神。这样的愿望改变了朋友的本性，这意味着朋友不再是朋友本人。与之类似，阿加认为，超人类主义无关人类的渴望和欲望，超人类主义者只是创造了具有非人类欲望和渴望的生物。

许多对超人类主义的批评都集中在根本优化的具体建议上。提升幸福的想法被批评为太像赫胥黎的《美丽新世界》，真正的幸福会被摧毁。超人类主义畅想的人类道德水平提高也受到了批评，因为这会使个人失去自主权或自由意志。批评者反对从根本上增进智力，因为这可能导致“邪恶天才”的诞生。超人类主义者坦然地进行了反驳。有一个论点聚焦于我们对“无辜伴生物”的看法。由于在遗传方面走运，总有一些人天生比别人更幸福、更道德、更聪明。超人类主义者认为，没有人认为这样的人缺乏真正的幸福，缺乏自由意志，或者很可能变成邪恶的天才。因此，超人类主义者认为，设想遗传优化会导致这种不良后果是完全错误的。想象一下，有两个受遗传因素影响比大多数人更幸福的人，一个人的基因组经过基因工程改造，另一个人靠运气获得了遗传素质。如果没有人告诉你，你就不会知道谁是哪种情况。因此，说这两个人中的某一个缺乏真正的幸福在道德上似乎太武断。超人类主义者拒绝接受这样一种观点，即天然与人工之间存在道德上的根本区别。

文化考量

超人类主义就人类未来提出了重要而深刻的问题。我希望读者明白，超人类主义的很多断言将成为21世纪的核心问题。一篇文章无法讨论可能受到超人类主义影响的所有领域，即使只是概括性地讨论。但最后，让我大致介绍一下另外几个需要考虑的问题。第一个是超人类主义与宗教之间的关系。虽然人们可能认为宗教必然与超人类主义相对立，但摩门教超人类主义者协会（Mormon Transhumanist Association）却是历史最悠久、最活跃的超人类主义者社团之一，也是推动宗教与超人类主义深度融合的几个组织之一。第二个问题关乎人造人，比如人工智能和机器人。而超人类主义与艺术之间的关系尚未开始讨论。超人类主义和政治之间的关系只在本章中顺带提及，但是支持超人类主义的候选人已经在几个国家竞选政治职位了。

最重要的是，这里没有提到全球性灾难的风险。正如他们关注先进技术的正当使用，超人类主义者同样关注如何避免不良后果，但确实，许多超人类主义感兴趣的先进技术不仅可以行善，也可以作恶。

第三部分　网络的未来

THE FUTURE ONLINE

云计算与物联网/网络安全/人工智能/量子计算

云计算与物联网

THE CLOUD AND INTERNET OF THINGS

文/娜奥米·克莱默（Naomi Climer）

在未来社会，我们的生活将因云计算技术与物联网（Internet of Thing，IoT）的强强联合而发生翻天覆地的变化。简单来讲，云计算技术为我们提供了通往海量存储、运行、应用和服务资源的渠道。它的出现，使得我们不再需要把什么都安装在自己的电脑里，我们只要知道从哪里获取这些功能就好。事实上，如果你在需要时用到它们，你会发现你能够获取、利用的资源远超个人电脑所能承载的。而且，一旦我们将信息和文件上传至“云”之后，其流动性将会大大提高。不管你是在巴黎还是去了开罗，都可以顺利地收发电子邮件；即使你和老板没有同在芝加哥或东京，你们也可以顺畅无碍地远程在线沟通；到了下班时间，你还可以在奈飞（Netflix）这样的影视平台上看电影或电视剧。今天，云计算技术的广泛运用已经大大方便了我们的生活，让我们的工作与娱乐方式也变得更加灵活。

与此同时，云在公司管理上的运用，也让多人协同办公更加方便。即使数据和设备都在异地，很多人也可以就同一任务进行远程合作。例如，在工业生产领域，专家可以在线提供技术支持，远程指导工作人员，这对工厂的生产运作来说极为重要。而在文化创意行业，以往电视台在报道奥运赛事时都要派出大型的导播团队，现在只需要派一部分工作人员到现场报道即可，大部分工作都可以在电视台本部完成。然而，想要实现以上这些技术突破，光靠网络还不够，我们还需要与此相关的协同工具。（如果你和十个人一起开过语音会议，就会知道安排每个人的发言时间有多难，但增加一个简单的可视化辅助工具，比如“举手”功能，整个会议就可以进行得更加顺利。）这类虚拟协同工具的质量和创意将成为未来云应用的关键动力。未来，人和人之间的联系将更加紧密，上面提到的这些只是一个很小的侧面。云计算技术将为这一切提供不可替代的作用。

如果互联网是一张搜集和交换数据的大网，那么物联网就是一张搜集和交换汽车、冰箱、温控器等各种实物的大网。在2016年，全球互联网数据统计网站（InternetWorldStates.com）曾经估测，当时互联网用户的总人数已达37亿。到了今天，在互联网上流通的实物数量要远远超过人的数量。有人预测，截至2021年，前者的总数将达到500亿。如今，帮助减肥人群监测体重变化，帮助病人持续监测心率、血糖变化的智能设备都已经出现在了我们的工作和生活中。这些设备可以应用在家庭护理领域，帮助我们照顾老人和孩子，而它们都是物联网的构成部分。虽然这些智能设备才刚刚进入我们的生活，但围绕其展开的讨论已

不绝于耳，从宏观层面上的社会影响和作为问题解决方案的有效性，到微观层面上对个人隐私与安全的影响，不论我们怀揣着怎样的忧虑，这股智能化的发展趋势都已不可阻挡。

尽管来自国内外的竞争压力不可小觑，但为了其中巨大的经济效益，各行各业都在默默尝试引入物联网技术。例如，风力发电厂可以利用从传感器传回的信息，对扇叶挥舞时的角度进行调整，尽可能地从风中提取能量，这就像人们驾船时为提高航行速度而根据风向调整帆的角度，正确的操作最多能让帆船多获取25%的能量。工厂数据和供应商共享，元件可以自动在需要的时候实现订购。另外，在生产线上安装传感器可以帮助管理者对机器进行故障监测，防止生产延迟，保证生产效率。博世（Bosch）和空客（Airbus）等跨国制造商可以做到在不同国家的工厂之间进行数据分享，以保证各地工厂在遇到生产问题时，都可以得到技术专家的协助，便于进行管理。

物联网具有的另一个优势是可以进行大规模的数据采集。低能耗的廉价传感器可以安装在任何装置和设备上，持续不断地搜集关于个人、环境、系统的实时数据，这样既可以帮助预防输水管道渗漏，也可以对流感疫情进行监测。

有了从各处搜集来的海量数据，我们如何做出明确的决策？在未来，这将成为人们引入物联网技术后面临的一大挑战。这里涉及的转换过程通常被概括为“DIKW体系”：资料（Data）—资讯（Information）—知识（Knowledge）—智慧（Wisdom）。举个例子，数据是你现在掌握的一串数字，它可能代表了编号32的商品和它的销售截止日期，紧接着你可能得知编号32的商品是某品牌的牛奶，它的销售截止日期是昨天。那么接下来你可以趁这批牛奶下架前多买一些，毕竟这个时候购买最为划算。但是，这仅仅是一个非常简单的示例，在未来，当我们掌握了大量的透明数据后，如何能从这些数据中提取重要信息，从而采取正确行动将成为一大难题。在人力市场上将产生与数据科学相关的新职位，企业和组织都会寻找能帮助他们分析数据的专业人员。这些人能帮助我们正确地发问，为我们发掘、构建重要的数据模型。

很有可能，在未来的几十年，世界上的大多数人将在城市居住。毫无疑问，大量人口的涌入，将给城市在能源、教育、医疗和交通等诸多方面带来巨大压力。为了应对这些挑战，围绕“智慧城市”这一概念，许多国家、地区的政府开始尝试让医疗、教育和交通等多个领域的网络管理系统互通，开发能让市民生活更便捷的技术应用。仅仅在英国，就有格拉斯哥、伦敦、布里斯托、彼得伯勒四座城市在努力推进“智慧城市”计划。这里少不了各种智能设备的影子：洛杉矶有方便盲人过街的交通信号灯，伦敦尤斯顿车站（Euston station）有智能垃圾箱，内置传感器能高效地协助垃圾分类。美国“大肚”公司（Bigbelly）、芬兰恩沃尔公司（Enevo）、韩国E立方公司（Ecube Labs）都是尝试利用新科技手段解决垃圾回收处理问题的企业，现在世界各地都有这些公司生产的智能垃圾箱。它们的内置传感器可以预测垃圾装满时间，而且能在装满后

将最短的垃圾收集路线发给清理人员，方便他们尽快赶来回收。只不过，虽然智能垃圾箱是一项很好的技术发明，但垃圾清理人员还是需要花时间来适应这项技术，调整他们的工作方式。

从以上事例中我们也能看到，未来我们要允许物联网、智能技术走入我们的生活。不论是涉及交通运输，还是在医疗与教育行业，物联网技术的优势在于，它能将看上去互不关联的事物联系起来，从而带来新的发明。一旦这种联系能够成功搭建起来，那么行业的服务质量和从业者的工作效率都能得到提升。不过，这与其说是一个技术难题，不如说是一个实际操作问题，企业和政府部门在此之前从未协同办公过，双方均需要不断努力才能达成这件事。目前，已有五个国家的政府部门依据开放原则协同促进虚拟经济发展。这五个国家分别是爱沙尼亚、以色列、新西兰、韩国和英国，它们不仅“身体力行”地诠释了信息公开透明、注重国际合作的办公原则，而且还在进一步地对其进行完善。

基于云计算和物联网的另外两项技术突破是VR（Virtual Reality，虚拟现实）和AR。这两项技术在游戏和主流商业市场的应用已极为普遍，现在它们也出现在了其他领域。利用VR技术，建筑师可以将自己的设计进一步可视化，房地产经纪人可以带客户参观、查看未建成的新屋，造船公司、飞机制造公司、石油公司在重大项目投资前，可预览最终成果的虚拟图像。还有一些工厂为技术工人提供了AR头戴装置，以帮助他们获得实时操作指导。虽然VR和AR技术面世时间不算长，但它们极有可能成为教师和医生的好工具，不论是将其用于工作还是进行娱乐消遣，这两项技术都有着巨大的潜力。

另外，除了现有的技术，我们还可以发掘物联网和云计算技术所具有的无限潜能，尝试解决一些棘手的全球问题。

随着越来越多的传感器出现在我们生活中，医疗健康产业也将有进一步的发展。这些传感器将帮助我们监控自己的身体状况和心情变化，鼓励我们更有效地做好健康管理，不管是在白天还是晚上。顶尖运动员早已把相关技术用到了极致，帮助自己达到最佳竞技状态。金融等高压行业的从业者每天要承受不小的压力，有的公司已经尝试监测员工的压力值，及时跟进、了解、控制工作环境带给人的负面影响。也许到了将来的某一天，我们能从身体传感设备那里获取不同类型的实时数据，对自己的身体状况有全面而动态的了解。我们的智能冰箱能根据它发送的数据，自动为我们订购大量的水果和蔬菜。当我们发烧时，中央供暖系统会接到通知，提高温度，以防我们再次受凉。病情加重时，设备还会帮我们打电话找医生，甚至可以在预知我们身体不适的情况下，主动帮我们取消第二天与他人的工作会面。

未来，远程医疗设备的诊疗和护理功能也会有所提升，老年人大多数时候可以在家接受诊断和治疗。机械外骨骼和假肢这样的可穿戴设备很有可能在融入物联网之后得到极大的发展，因为这将引入以人体机能为基础的新型控制机制。例如，这些设备可以通过平板电脑发出的指令

活动身体，触摸仿生公司（Touch Bionics）研发的智能仿生手（i-limb）就可以通过手机上的应用程序来操作。

通过分析物联网提供的海量数据，我们可以找到新的模式，这将帮助某些领域的研究取得革命性的突破。举个例子，斯坦福大学利用大数据进行疾病分析，研究某些疾病如何让人的基因发生突变，导致药物失效。研究人员最后得出结论：目前市面上许多针对特定疾病的药物毫无作用，但在其他一些疾病的治疗上又颇有成效。鉴于新药临床试验的资金投入和时间成本巨大，这一发现意义重大。但是，与此相关的临床数据也应该足够公开透明，供所有人了解和使用。目前，美国和欧洲的制药公司已同意与相关机构分享临床数据。未来，我们也可以期待在其他行业看到类似的技术突破。

个人的疾病治疗方案也将变得更有针对性。大数据应用不断渗透个人生活，医生在下诊断和制订治疗方案前，极有可能先对患者的情况进行全面的分析，了解他的基因信息和个人生活（此人使用的在线社交平台，他的工作简历、运动爱好，他是否加入了某个葡萄酒俱乐部……这些信息都可以作为依据），并且调取前一次治疗的药物反应，还有相关病症的研究资料。当然，想要让这一构想成真，我们还需要先解决各种与隐私安全有关的重要问题（关于这点，下文会有更多介绍），但大数据分析技术在医疗健康领域的应用前景不可小觑。

物联网和云计算技术还有一项未完全展露的优势，这关乎它在全球教育领域的应用。社会的结构在发生改变，理论上说，这两项技术的出现能让全世界的每一个人都有机会学习现代人必备的知识和技能，为迎接知识经济时代的到来做好准备。但这当中的最大问题是：我们能否让每个人都接触到互联网？这不仅是联合国和世界经济论坛已经注意到的问题，而且也是Facebook、微软、谷歌这样的科技巨头，以及各界名人、慈善家致力于解决的问题。

对于许多为生活奔忙的普通人来说，物联网和云计算技术所打造的虚拟世界以数据为驱力，交互充分，效率极高，能满足个人需求。因此，这两项技术有不小的潜力，不仅可以协助节约家用能源、减少食物浪费，提高工作效率，还能满足医疗健康方面的个人需求。

然而，实现这些梦想的道路上还有很多的阻碍，总体可以归纳为四点：安全问题、覆盖率问题、能源问题和社会问题。

首先，相关技术在个人隐私和信息安全方面就有一连串的问题。个人要面对的主要就是个人数据的安全问题。如果想让物联网技术充分发挥其威力，智能设备需要全方位地搜集个人的信息。获取信息的阻力越大，它就越难提供周到的服务。从某种程度上来说，这是个人选择问题，可不论怎样，设备的安全系统首先要足够强大，除此之外，养成注意保护信息的网络安全意识同样也很重要。当然，这里还有许多与网络巨头有关的问题，苹果、Facebook和谷歌这样的大型科技公司，以及各

国政府都掌握了海量的个人信息。企业和机构可以利用这些信息，为我们提供高品质的定制化服务，但数据被滥用的概率也大大提升了。需要注意的是，私人定制服务和信息窃取行为往往就是一线之隔！保险公司有可能根据你的健康数据提高你交纳的健康保险费用；你个人生活方面的数据有可能成为报税信息的核对依据；如果没有保管好个人信息，你的身份可能会被盗用，导致经济利益和人身权利受损。而到了今天，科技巨头掌握着用户个人信息的直接通道，收集的信息越来越多，收入越来越可观，权力也变得越来越大。这样的权力可以用来行善事，也可以进行剥削和恶意控制。全世界的政府部门和民间消费者组织每天都在与这样的庞大势力进行博弈。

对于个人和公司来说，任何与网络连接的设备都可能成为黑客入侵的通路。黑客是否可能通过控制你家的智能水壶来控制你的房子？政府部门是否可以入侵联网设备从而控制一家发电厂？糟糕的是，以上这些担忧都有可能成为现实。前几年关于黑客的网络攻击案例中，2010年的“震网”（Stuxnet）事故尤为具有代表性，这种名为“震网”的蠕虫病毒会感染伊朗核设施中的工业控制程序，修改程序命令，让核心设备（离心机）异常加速运转，最终使其报废。根据此后的新闻报道，伊朗全国五分之一的离心机都被这种病毒摧毁了。而在2015年，乌克兰电力部门遭到了黑客的恶意代码攻击，八万人受到断电事故影响。这两起网络攻击事件让我们看到，未来的军事战场有可能延伸至互联网领域，敌对国之间有可能利用物联网和云计算技术制造打击敌人的武器。

同样是在2015年，几位高手成功向所有人展示了如何通过入侵车载多媒体系统来控制一辆行驶在高速公路上的吉普车。在这次出于研究目的的“善意入侵”之后，汽车制造业已加大了防范力度，以避免联网汽车遭到此类攻击。不论事关联网汽车、智能家电设备，还是某公司的商业机密，或是发电站和水坝这样的公共设施，个人、商业组织、政府面临的网络攻击威胁都是显而易见的。时评员和专业人士也一致认为，向网络攻击发起的反击战将会打响，在未来的几十年内，网络安全问题将成为所有人关注的头号问题。

更现实的问题涉及网络覆盖率。不论是光纤网络、无线网络，还是蜂窝网络，物联网设备只有与网络连接后才能派上用场。虽然在城市中上网很容易，但到了偏远地区，这点就很难得到保障。但是，网络连接是无人驾驶汽车、远程手术、遥感技术（如水文遥感）存在的先决条件，为了解决偏远地区的网络传输问题，全球已投入大量的人力物力。而移动通信下一个阶段的5G技术将有可能攻克这一难题，其更高的覆盖率、对数十万并发连接的支持将成为新的行业技术规范。毫无疑问，要想真正实现全面的、稳定的、高带宽的网络覆盖，需要电信、有线网络、无线网络和卫星通信技术共同发力。为了能更高效地利用网络技术，个人、民间组织、企业和政府之间的联系和合作也需要更加紧密。以后的产品需要将网络连接功能纳入设计考量，其他服务行业（如电信运营）也需要开始考虑如何满足交通运输业、医疗卫生业、娱乐业、农业等行业的需求。为了能享受到优质服务，我们也愿意分享自己的个人

数据，这样才能让所有人都接收到更为准确的信息。

随着网络覆盖率的提高，数据流也会大幅增加，相应的支持设施也要随之扩增。根据思科公司的预测，到了2020年，人们需要使用的数据量将增长十倍。数据大增是否会导致耗电大增？这样的争论已经不再激烈。根据英国《独立报》报道，在2016年，数据中心消耗了全球3%的能源，2026年，数据中心的耗电量将是2016年的三倍。为了应对物联网的需求，搜集、存储和运行数据的设备在不断增加，间接导致了这一增长，但这毕竟不是最重要的原因。一般来说，物联网传感器能获取的数据不算多，一个普通的传感器一年只能产生几百兆字节的数据，相比之下，视频播放一小时就需要大约一千兆字节的数据，这对数据处理和存储功能要求都很高。现在，视频已经占用了大量的网络资源，但娱乐、医疗、休闲和工业对影像的需求都在与日俱增。这其实是一个严肃的能源消耗问题，为了更丰厚的经济利益，各地的数据中心都在设法升级设备，提高能效。Facebook、谷歌和苹果等大公司都在尽可能地尝试利用可再生能源。有的企业将数据中心建在气候较寒冷的地区，以节省冷却费用，有的企业不断优化系统架构和操作程序，以此降低能耗。有人甚至预言，未来，为了遏制能源消耗的增长，人们观看视频需要领取配额缴税。

除了安全、覆盖率和能源问题，还有从技术进步衍生而来的社会问题，其中有一些前文中已经有所介绍。人们未来的工作问题就是一个例子：周边所有事物都智能化、自动化了，我们还可以干什么呢？未来有哪些工作是只有人能做的？我们在学校里要接受什么样的教育，才能跟上这个快速变化的世界？

人类未来的工作可以单独成为一个研究命题，而我们要重点关注的是未来工作的种类、就业教育，以及怎样成功建设“职业不分贵贱”的社会。芬兰、纳米比亚、加拿大和美国等国家已经开始就此进行尝试，例如给全民发放无条件基本收入（Universal Basic Income）或者缩短工作时长。在英国，苏格兰或许将成为首个进行类似尝试的地区。虽然，“人类将不用工作”的预言已被反复提及了几个世纪，但从历史来看，每一次新技术的出现都催生了新的职业，而且新职业数量往往都大于消失的职业。然而，这个预言一定不会实现吗？现在进行判断，恐怕为时过早。

除此之外，物联网技术还极有可能为共享经济体提供助力，在这里，个人所有权将变得不再那么重要。现在，我们只需要在平台上付费就能听音乐或看电影，不再需要购买实体产品。在未来，我们也很有可能与别人共享我们的汽车、厨房甚至宠物。在韩国，“共享客厅”已颇受欢迎。普通的公寓太小，而年纪不大的成年子女时常离开小家，回去和父母一起住，因此，公共空间按小时出租是个不错的方案，年轻人可以在一个像家一样的舒适环境里轻松社交。另外，未来我们会越来越多地在外就餐，家中的厨房也变得越来越可有可无。有可能，未来的公寓设计会安排多个公共厨房，而不是每户人家单独有一个厨房。洛杉矶有的公寓内部就已经建有多功能停车场，一旦汽车共享成为主流趋势，这些

停车场就可以“改头换面”成健身房或者电影院。而在纽约，在合理的监督机制下，你可以按小时租一只宠物狗陪自己散步。对于那些担心自己责任心不够，不敢养宠物的人（或是暂时需要多养一只猫解决家中鼠患问题的人），租一只宠物事实上是一个颇有吸引力的选择。但共享经济会不可避免地让制造业陷入窘境——从理论上讲，如果共享经济普及，那我们就不需要制造那么多商品了。随着服务业的繁荣，实体商品的需求量也会逐步下降。

总的来说，虽然仍有许多严峻的问题有待解决，但面对未来世界的许多重大变革，互联网和云计算仍将是最有力的技术支持与保障。为了看到未来的各种可能性，让这个世界变得更好，我们需要的是更棒的想象力和创造力——这很可能来自在网络时代成长起来的“数字原住民”。未来，我们的生活能否变得更好，企业的生产效率能否得到提高，某些全球问题能否得以解决，极大程度上取决于我们怎么发掘和释放物联网和云计算技术所具有的巨大潜力。

网络安全

CYBER SECURITY

文/艾伦·伍德沃德（Alan Woodward）

都市传说不是真的，我们发明互联网并不是为了对抗核战。最早的互联网[以“阿帕网”（ARPANet）而闻名，由美国国防高级研究计划局（Advanced Research Project Agency）研发]是为方便研究者分享资源而生的。蒂姆·伯纳斯-李（Tim Berners-Lee）创建了超文本标记语言（HTML），万维网诞生，互联网的理念延续发展。到了20世纪90年代中期，互联网开始投入商用，情况发生了变化。我们很快就意识到，如果我们的财务信息要在便利但不私密的新网络环境流通，那么我们必须有办法保护自己的隐私，保障我们的信息安全。糟糕的是，这个崭新的线上世界——网络世界——原本的技术架构就不是为安全而设计的。网络犯罪无可避免地紧随在线交易而来，利用网络的致命缺陷作恶，由此，网络安全工作诞生了。

对于不断涌现的网络安全要求，任何有计算机的人都不会觉得陌生（最起码我希望他们不陌生）：个人计算机要安装杀毒软件和防火墙，设置密码要养成良好的安全意识，等等。犯罪分子越发狡猾，普通人只能不断提高警觉，注意更新安全措施。但问题没有消失。即便是《星际迷航》中史波克那样冷静的人，也会暴露可供犯罪分子利用的人性弱点。在网络“七宗罪”（冷漠、好奇、轻信、殷勤、贪婪、胆怯、冲动）中，冷漠或许是最致命的，认为自己绝不会碰上网络安全事故的人基本上都会碰上网络安全事故。在解决“PICNIC”（Problem is In the Chair Not In the Computer，问题在于使用者而非工具）即用户错误操作问题的过程中，许多计算机科学家甚至不再确定人类能够跳出这一死循环。

美国国防高级研究计划局也再次行动起来，发起了一项比赛，鼓励创建保护电脑免受网络攻击的人工智能安全系统，但其中不能有任何人力介入。2016年，这项比赛的首次决赛在拉斯维加斯举行，每年全世界的技术高手都会来这里参加黑帽和DefCon这类的科技大会，交流想法，展示最新的技术成果。

虽然野心不小，但第一届比赛十分朴素。国防高级研究计划局给了参赛者几个程序，让他们用各自打造的安全系统进行分析，查出程序是否会在进行特定输入后崩溃，接着真正的考验来了，他们要改进这些程序，避免它们再受到同样的攻击。

在这场网络安全的“夺旗赛”上，自动化系统与人针锋相对。最终的结果不太明确——每个系统都有一些出色的地方，也有一些不尽如人意

的地方。有趣的是，当时“机器学习”这一概念已经诞生了，而“学习”可以说是电脑最擅长做的事情。得到的数据越多，它就越来越擅长辨别模式（比如识别黑客可以利用的漏洞）。现在，这已不是什么惊人的发现，许多专业团队已开始研究如何让机器学习理论在网络安全领域派上用场。

在这次比赛中，人工智能系统并没有比人类更好地辨别特定模式，但这没什么。毕竟，这只是初步的尝试。不过，这让我们看到，人工智能的确有支撑未来互联网安全工作的可能，这一趋势在此之前就有迹可循。在同一会场，正当比赛进行时，一家公司发布了一款杀毒软件，它被称作第一款具有“认知”能力的智能杀毒软件。这就是深甲（Deep Armor）。

深甲只关注网络安全工作的其中一个方面（杀毒），但要想做好这方面的工作，我们确实非常需要人工智能的帮助。因为人类（或者任何有人类参与的流程）根本无法应对潮水般涌来的各种计算机病毒变体。现在，我们每天都要面对近百万种的新型网络威胁，其中大部分都是现有病毒的变体，每一种都需要先被辨认出来，之后杀毒软件才能知道如何消灭它们。但这样会使情况变得越来越糟，因为犯罪分子也可以利用技术避开杀毒软件。他们制造了如野外生物病毒一般可以变形的网络病毒——你可以掌握它正在运行的原型代码，但在几次感染后，病毒又会变得无法识别。这一切并不令人惊讶。深甲在面对这种情况时会启动一款类似人类免疫系统的杀毒软件——它被恰如其分地命名为“数字抗原”（Antigena）。

这种做法彻底改变了我们对网络安全工作的看法，重塑了我们的防御模式。互联网安全工作的第一阶段主要关注如何在一开始阻止攻击。我们的系统就像一座城堡，不论是你的家用计算机还是医院的电子病历系统，一切都在开启时进行了防御病毒和攻击的设置，但当所有人参与其中，使得人与人、人与计算机、计算机与计算机之间的联系构成庞大而复杂的网络时，这些原始构想都失效了。这种被称为“外围安全防护”的措施已经失效了。现在，我们欢迎别人来城堡做客，但不会允许他们离开时带走城堡中最珍贵的王冠。我们既需要匿名访客准入机制，也要有识别可疑角色的能力。

最近的一项技术成果模仿了我们在许多城堡中已经见过的多层防御策略。我们可以允许人们在城堡的某些区域自由行走，甚至可以授权不同级别的人进入计算机宫殿的核心区，我们将王冠存放在最安全的区域即可。

事实证明，机器非常善于观察我们的行为，并能将其中一些与坏的征兆联系起来。事实上，你让机器观察得越多，它就越擅长辨认可疑行为，随着数据集增加，辨认的正确率也会有奇迹般的提升。由此看来，未来的网络安全工作重点已变得十分清晰：我们可以将所有的工作都交给电脑处理。但是，没有任何人为干涉，完全应用和依靠人工智能技

术，这会引发一些颇耐人寻味的问题，关键在于，我们得首先教会机器如何工作。因此，我们会基于自己的利益对机器进行训练。

首先，互联网有可能成为人工智能善恶之争的电子战场。以后，我们的“电子防御系统”也许每天都会对抗电子病毒感染，我们要习惯这样的生活，就像我们自然而然地生活，不必知道自己体内每天都有“生理战争”。大多数时候我们不会发现免疫系统在做什么，但有时我们会知道自己被感染了，需要服用抗生素。而且，如果病毒比免疫系统威力更大，那么病人就会死去。在有些情况下，我们无法给自己的系统杀毒，我们只能抹掉它，然后用干净的软件进行重装。这种情况很早就出现了，个人计算机被勒索病毒感染就是一个典型的例子，遇到这种情况，除了重装系统，你别无选择（假设你没有在怂恿之下支付赎金）。当然，最重要的是给计算机做好数据备份，这才是个人计算机里最有价值的部分，是你重新开始的必需。

另外，我们能允许人工智能对我们的生活享有多大的控制权呢？我们可以不执行人工智能授意的操作吗？也许你认为我们当然有权说“不”，但糟糕的是，这个时候“七宗罪”再次出现了。设想一下，你正要打开一个网站，人工智能却监测到这里有问题，并且警告你不要有进一步的操作。这时，你也许希望有个拒绝按钮能让你跳过这个警告，而科学研究也证明了人类有这种忽视警告的倾向。这也许是因为我们冷漠或者有好奇心，也许纯粹是因为我们不喜欢服从命令。不论你是怎么想的，这个时候继续操作，你的系统就很有可能会被感染。如果你有这样的忧虑，那也许让人工智能完全掌握控制权的确是最好的。

相关研究显示，以后我们会碰到无数这样的警告，最后，我们总会忽略它们。这种心理现象有一个专门的说法——“安全性疲劳”，它会导致人们行事鲁莽。为了避免发生这样的情况，人工智能在未来要学会判断哪些是最为严重的安全隐患，警告数量达到多少就算太多，人工智能还要在发出警告前判断、筛选出有效警告，这样才能引起我们的重视。不过人工智能不会通过练习获得判断力，只有我们人类会这样，人工智能只会简单地说“是”或“不是”。

这也给我们带来了另一种困扰，那就是什么人需要把控制权交给系统。例如，你是否可以命令人工智能审查你浏览的网站？这些问题最终会让我们思考网络中究竟有哪些内容是有害的。如今，网络安全工作已经开始避免未成年人浏览载有极端信息和误导性信息的网站。就算未来的人工智能可以让我们免受好奇心之苦，谁又来定义这个界限呢？我们要让人工智能来判断和决定什么有害吗？许多有识之士已经看到了这种做法不可取。即使没有令人生厌的强制性引导和保姆化设置，发展到一定程度，人工智能也可以将网上的所有发现都判定为有害。“有害”这个词的定义将变得暧昧不清。

在下一个十年，我们要决定究竟是让人工智能系统保护我们，还是依赖现有的传统措施。这个决定不简单，为了公众的利益，所有人都要

积极地参与讨论。如果我们不想要人工智能安全系统，而传统的安全措施渐渐失效，那我们还有其他选择吗？也许有吧。

假设我们一定要介入网络安全的怪圈。没有我们参与的情境会出现什么问题？以物联网为例，这是一支规模不断增长的智能产品军队，如果它们可以避开我们进行交流，那怎么办？冰箱、水壶和烤面包机以后都可以与网络连接，为我们提供更便捷的服务。虽然你的水壶没有什么值得黑客侵入盗取的宝贵数据，但它有可能成为“僵尸网络”的一员，黑客可以用它来发动分布式拒绝服务攻击（Distributed Denial of Service，DDoS），向某个系统发送大量无用数据，导致系统无法为正常的用户服务。物联网日后的规模是现在的我们难以想象的，未来会有数以百万计的设备连在一起。黑客有能力操控过剩的闲置设备。我们有可能要面临一个很可笑的局面，看着自己的国家被本国的产品给掌控了。

所以，让我们回到底层，也就是互联网创建的技术基础。我们可以对其做些修改，比如，无论做什么，你在网上的用户身份都是明确的，和你在网上交流的人用户身份也是明确的。收到一份电子邮件时，你能马上知道发送者的身份。如果一家网站上有恶意软件，那你的系统就能立即追踪和屏蔽它；如果有袭击者在探查你的电脑系统，你能马上知道他的身份和来历。不过，要做到这些，互联网协议就要升级到第6版（IPv6）。这项协议自20世纪90年代就已存在，也许它正在你的电脑上运行，但我们目前还是没有将其推广成功。大部分人觉得继续使用第4版互联网协议（IPv4）没什么问题，但事实并非如此。

如果想获得网络安全方面的保障，我们需要的不是新电脑，而是：第一，我们要采用第6版的互联网协议；第二，每个人都要心甘情愿地创建电子版的真实身份。这就是问题所在，并非所有人都愿意有一个明确的电子身份。人们已经习惯将网络视为远离现实规则束缚，可以来去自如的地方。另外，我们很喜欢以匿名身份浏览各类网站，有些人甚至做得更彻底，为了保护自己的匿名身份，他们用“洋葱路由器”（The Onion Router，TOR）隐藏自己的第4版互联网协议地址。

当初，美国海军研究室出于善意研发了TOR，但现在，TOR的“隐藏服务”使它臭名昭著。有些网站只能用TOR打开，浏览时真实地址无法定位，这就是人们口中的“暗网”——一个能进行任何交易的地方，从毒品到大规模杀伤性武器的零件，你都可以在那里买到。现在，各种虚拟货币在暗网上流通，其中最为人所熟知的便是比特币。设计者原本就是想让这些加密货币成为电子货币的等值代币，它们不仅不易追踪，而且流通性很强。所以，欧洲刑警组织（Europol）发现全球40%的黑钱都以这种货币的形式流动，这完全不值得惊讶。

正因如此，执法部门也在加大力度查办这些暗网上的非法行径。利用技术，执法人员也能找到方法，破除暗网提供给犯罪分子的“匿名身份”。然而，这是一场关于技术的持久战，一旦我们发明了揭露犯罪分子

真面目的技术，那么掩盖他们身份的技术也会升级，执法部门的努力可能功亏一篑。即使我们发现了对方的致命缺陷，很快也会有新的技术产生。举个例子，TOR在一定程度上依靠自愿加入的人提供的节点保证用户匿名使用系统。一旦执法部门用同样的方法建立节点，就可以抢先了解暗网上的各种动态。接下来，这项技术会升级，以便保护其他暗网用户的匿名状态，使其免受“坏洋葱”（执法部门）的破坏。由此，有隐形网络之称的P2P暗网诞生了。与广为人知的TOR不同，它虽然遍布整个网络世界，却隐藏在这个时代的喧嚣背后。

经过加密的电子货币（加密货币）也存在这种情况。这里使用了一种名为“区块链”的技术。在这里，所有的交易都是公开的，没法被伪造或推翻，而且完全可以匿名进行。刑侦策略里最基本的操作便是“跟着钱走”，但经过技术上的设计，即使是比特币这种声名在外的加密货币也会让这个策略很难生效。就算有技术介入，能保证执法部门查清钱流向哪里，也会有新的电子货币诞生。为了对抗警察的网络追踪技术，还有人发明了“零货币”（ZeroCoin）。

就算第6版互联网协议和它的安全附件在未来会成为默认的网络安全设置，只要不愿遵守法律规定的用户以及犯罪分子依旧希望保持匿名状态，像TOR这样的技术还是会存在（即使不得不进行结构上的调整），这就使得引进第6版互联网协议没有丝毫意义。第6版互联网协议和配套的安全措施目前没有成功普及，支持者的热情还在。我们迟早会接纳这一技术。不过，我们最终仍有可能身处一个分化的互联网世界：在一个世界里，人们愿意进行身份认证但有可能被追踪；在另一个世界里，人们希望远离身份认证系统。有些国家的人没有选择，但你可以把这些地方想象成有围墙的花园，你在其中进行任何活动都可以免于袭击。但是，如果你将这个带围墙的花园视为镀金的鸟笼，那么你也可以离开，转身去另一个残存的互联网世界，那里更像是未经开拓的美国西部。这个选择权在你。也许你会发现，逃离了围墙花园的庇护，你就再也回不来了。毕竟，对于一个封闭的无菌环境，离开后想再回来的人必然需要接受一系列检查，因为他保不齐就带了脏东西回家。

黑客则会盯上那些在安全区活动的人。他们必定会想法儿潜入安全区，坑害没有防备意识的用户。今天，我们都知道黑客的社会工程学手段。例如，他们会给我们发送熟悉的电子邮件地址或者部分个人信息，诱导我们打开某个未知链接。如果这些突然出现，那么这些诡计会更容易影响我们。在有墙保护的花园里发动这样的攻击虽然不容易，但这迟早会发生。

作为我们这个有墙花园的一部分，物联网设备将成为黑客瞄准的弱点。研究一下银行抢劫案例你就会知道，得手的大盗不会从前门攻入，他们利用下水道偷偷潜入，等内部人员发现财物被洗劫一空时，他们早就逃之夭夭了。虽然没有哪个网络世界是绝对安全的，但未来的网络世界总会比我们现在的安全。问题是你要选择这道墙的哪一边。

也许未来的网络世界会有两套截然不同的治安。在安全区，我们仍然需要警察，即使他们只负责处理商业纠纷，或者像街区巡警一样，负责了解一个区域所有住户的情况，必要时进行私下问询。在安全区外，我们需要的是美国西部警长那样的治安人员。这些网络警长是特种技术人员，有权追捕和缉拿网络罪犯。这样的专业警察在其他领域也有，举个例子，当伦敦地铁开始运营时，新形式的犯罪尾随而至，英国交通警察局因此正式成立。恐怖分子盯上民用飞机，空警越发警惕，加紧防范。互联网遍布全球，在未来，我们也许需要联合国的网络维和部队来维持安全区外的秩序。关键问题是谁可以授权这些网络警察采取行动。

不论是在这种安全区的内部还是外部，我们都要面对一个核心问题：应该采用何种法律？当下现实中的法律执行范围要依国境而定，但遵循这个原则，我们就无从打击网络犯罪了——即使我给别人发送了数不清的诈骗邮件，成功骗到了一个外国人的钱，那我也不大可能被人追捕，更别提被起诉了，毕竟我没有拿着一把短管霰弹枪走进银行。而且，网络犯罪能带来暴利，一旦得手，那就是以一分投入获得十倍回报，而且其中的风险很小。所以，毫不令人意外，情节恶劣的网络犯罪正是现在最严重的一种罪，但我们到目前为止还没有独立的网络执法部门。

为了应对这些问题，我们可以尝试采用通信或飞机航线的管理方法，协商并制定国际条约。然而，网络空间的情况更加复杂。人们花费了数十年的时间才在飞机航线、电报通信和电话通信领域厘清哪种情况要采用哪国法律，这些领域相对而言还不算广阔。一开始，我们认为所有人对网络犯罪行为的界定都一样，但事实并非如此。举个例子，世界上有许多国家达成共识，会一致保护文字工作者、音乐家和电影制作者的版权，不论是否在本国，他们的权利都会得到保护。但是有些国家（尤其是原属苏联的国家，还有东欧和亚洲的一些国家）在版权保护上的行动严重滞后。所以，毫无意外，这少数几个国家要为大部分盗版作品的传播负责。

也许，最后我们会面临这样一个局面：在秩序混乱的网络环境中，网络警长本人代表法律，或者他与网络治安会会员一起维持法律与秩序。这不是什么新现象。现在，我们起码能保证执法部门公平执法，任何人触犯法律都能立即受到惩处。过往历史也告诉我们，在法律制度缺位的环境里，民间自发的治安往往会施法过重。

所以，我们现在处境尴尬，进退两难：要么采用非黑即白的人工智能安全系统，要么接受网络警长易出错的人为治理。事关未来的互联网安全，这的确不是一件能够轻易决定的事。唯一能确定的，就是犯罪分子总是会钻执法部门的空子，我们要么团结一致保护自身安全，要么将这份工作交给某个人或某个事物，比如电影《地球停转之日》（*The Day the Earth Stood Still*）里维护和平的机器人戈特（Gort），或者《义海倾情》（*Wyatt Earp*）里的那位英雄，这由你来决定。

人工智能

ARTIFICIAL INTELLIGENCE

文/玛格丽特·A.博登（Margaret A.Boden）

虽然我们没法确切预知人工智能将来会出现在哪些领域，但我们很容易知道它不会出现在哪儿——反正它不会藏在石头底下。未来，人工智能技术的存在将是普遍的、必然的。

我们早已在社会的各个角落看到人工智能活跃的身影。它是所有互联网研究和手机应用程序的核心。它出现在GPS导航、电脑游戏和好莱坞动画片中，出现在每家银行、保险公司和医院，当然，它还出现在智能手表和无人驾驶汽车上。

在未来，它会出现在各个地方：法庭、办公室、老人的家中……甚至婚姻登记所。火星探测机器人将有数不清的表亲在仓库工作。物联网还能将可穿戴装置（可监测我们的位置、运动状态和血压）与我们家中、办公室、街道与餐馆的总控装置连接。这可不是“老大哥正在看着你”，这更像是数不清的“小兄弟”在不停地说着话。

人工智能的发展极其迅猛——事实上，它早已开始。几十年内，数不清的人工智能应用将重塑我们的生活。企业的发展将极大地依靠人工智能技术。比如，根据人工智能技术提出的医学和农业方面的专业意见，可以传递给离现代医院或农学家甚远的人，发展中国家也会受到影响。

这一切之所以能够实现，一个重要原因在于机器学习对大数据的利用，这使得大量的信息被用来分析人类的行为模式和倾向。这就是人工智能领域的深度学习技术，现在距离它首次提出已有二十多年，但当时的计算机性能不够强大，所以深度学习一直无法投入实践。但在过去的几年里，计算机的性能和存储容量已有了极大的提高，能保证今天的机器学习以每秒100京次运算利用存有数十亿数据的数据库。

这种类型的机器学习能在大量的数据集和不同层级的细节中找到模式。举个例子，大数据也许包含一座城市的公路上所有小型汽车和卡车当下的行驶速度和位置，每个交通信号灯的最新动态，或者包括一个地区乃至一个国家所有医院的病历，其中记录着每个病人的症状、用药剂量和效果。

人工智能系统并不设置“做完这个做那个”的传统程序。它由多层神经网络构成，上一层网络的输出是下一层网络的输入。每一层包含成千

上万个单元，它们彼此之间传递信号，直到形成稳定的数据模型。通常，这些模式是全新的、出人意料的，就连运行系统的人也无法提前发现。

在2016年，由谷歌深度学习部门开发的围棋软件战胜了世界第一围棋手——这比战胜国际象棋冠军要难得多（1997年，IBM的计算机“深蓝”做到了这一点）。但在当时，这仅仅被视作一次竞技游戏，相关技术让人印象深刻，却无实际功用。然而现在，从各国政府到全球资源雄厚的大公司都已经开始运用人工智能技术。随着这项技术的研发成本逐渐降低，可以投入应用的天地将变得越发广阔，它在未来将渐渐延伸至社会的各个领域。

也许你认为深度学习已发展到“今天付诸行动，明天就能得偿所愿”的惊人地步，但事实并非如此。虽然这项技术的学习系统已十分强大，但我们对它的运行原理仍不大清楚。用行话来说，这就是“黑盒”——虽然系统的输入与输出可见，但我们对其内部究竟如何运行仍然所知有限。设计者或者程序员并不完全清楚它究竟如何工作，所以他们也没法准确预测其下一步行动。在充分意识到这一问题后，人们投入了大量的人力和财力，但没人知道究竟什么时候能解决这一难题，我们甚至不能确定这些“黑盒”能否变成相对容易理解和控制的“灰盒”（在“不能解决”与“解决”之间，能够让我们先明白原理，充分了解运行规律的系统），我们也许永远得不到答案。

所以，我们要谨慎对待未来，有些事情远比大多数人想的复杂，比如通用人工智能（Artificial General Intelligence，简称AGI）。这涵盖了艾伦·图灵和在他之前的人工智能先驱所追求的目标。他们希望人工智能能像人类一样懂得举一反三，知道如何随机应变。虽然先驱目标一致，但这个目标实现起来尤为艰难——人工智能最终不仅要具有解决各类问题的能力，还要自如地开口说话，看得见也听得见，除了会学习，还有创造力。当然，它还要有行动能力，比如可以操控机器人。换句话说，这个我们理想中的程序与我们熟悉的计算机程序和手机应用软件全然不同，后者只关注一个领域，专而不全。

最开始，研究人员对通用人工智能寄予了很高的期望。在1959年，有一个程序甚至被命名为“通用问题求解器”（General Problem Solver）。从理论上讲，只要能够按主次分解成多个小问题，任何问题都可以依序解决。（事实上，程序员在编写程序时，就是要将问题用这种方式进行陈述，这可以说是编程时最难的部分。）

这个程序成功解决了传教士和食人者的渡河问题——三个食人者和三个传教士要渡河，但他们眼前只有一条能载两个人的船，无论是在岸上还是在船上，食人者的数量不能比传教士多，否则传教士会被吃掉，那么如何让所有人顺利渡河呢？这一成功可谓非同凡响，因为这道题里面藏有陷阱（你也可以开动脑筋想想）。当时，这个问题是人工智能的标准测试题之一，所以当一台机器正确回答了这个问题，专业人士当然

是非常兴奋的。

为了能提升其性能，扩大应用范围，研究人员投入了不少心血，但还是举步维艰。到了20世纪70年代末，许多人工智能的研究者开始将研究范围缩小，研发所谓的“专家系统”，例如专门诊断某种疾病以及为此类病人制订用药方案的系统。当时，各种以实例为基础的知识（例如医学诊断）被源源不断地输入人工智能系统中，“将世界上的知识放入人工智能系统”成了从业者的信条。

今天，“专家系统”这个词已不再新潮，现在的此类系统包含了各种实例，可用来处理或简单或复杂的任务，从石油勘探、机器翻译、面部识别到寻找离你最近的印度餐馆。在21世纪，人工智能的研究仍然集中于这种服务单一领域的系统。通用人工智能明显不在此列。如今，通用人工智能研究再次变得如火如荼。（下文的LIDA认识研究模型就是一个例子。）但是，目前还没有哪个通用人工智能系统像图灵设想的那般“通用”。

也许IBM公司沃森计划（Watson program）的拥护者对此持有异议，他们会说人类已经掌握了通用人工智能技术。毕竟在2011年，沃森战胜了《危险边缘》（*Jeopardy!*）的两位冠军。在这档智力竞赛节目中，选手不会被直接提问，他们要解析线索，说出答案可能对应的问题，例如，选手不会面对“法国的首都是哪座城市”这样的问题，他们会收到“这座城市的名字是某一连锁酒店的女继承人的名字”这样的提示。这样的问题需要答题人利用发散思维，进行广泛联想。

沃森在《危险边缘》中取得的多次胜利毋庸置疑，这的确值得设计者为之自豪。但沃森的认知方式依然不同于我们。举个例子，当沃森遇到一位残疾运动员时，它会正确地将注意力放在这位运动员的腿上，但它无法靠数据库真正理解“失去腿的运动员”意味着什么。即使程序员在后来突显了“残疾”这一词的重要性，防止程序对事实做出错误判断，事情的本质也没有改变。如果换作一个人遇到这位运动员，他显然能够知道缺失一条腿对这位运动员的运动技能和日常生活造成的影响，所以他从一开始就会知道缺腿意味着残疾。这种与人类及其日常生活的关联，是所有通用人工智能都要面对的巨大烦恼。如果人类为它们简化事实，那么人工智能就不知道怎么才能做出和人类一样的反应。

换句话说，有些富有野心的人工智能或通用人工智能项目极其难以完成，即使在理论上可行（毕竟，人类的大脑也不是靠魔法驱动的），它们也永远无法投入实际应用。

一些认同奇点理论的人工智能专家却不这么看，他们大约在二十年前就猜想，到了某个时间点，作为机器的人工智能在不断快速提高自己的认知水平后，将赶上甚至超越人类。（此类预测多种多样，但许多人工智能专家预测奇点将在本世纪末到来。）一些对此坚信不疑的人认为，到了那时，全球的战争、贫穷、饥荒、疾病问题都会被一并解决，

人类甚至有可能永生。

这样的观点其实颇有争议。比如，非人类的智能系统能化解中东政治危机吗？诚然，到目前为止，我们人类也没有很好地处理这件事。相信人工智能有这样的能力是一种信仰，这要求人们极其相信技术进步的力量，这对很多人（包括我）来说未免有点儿太过了：这里牵涉的政治敏感问题和历史背景问题太过复杂，人工智能在其中起不了多少作用。

在另外一些奇点信仰者的未来构想中，机器人将会接管我们的社会，到时候人类将面临灭顶之灾。在他们看来，拥有超级智能的AI会为达目的不择手段，我们将因此付出惨痛的代价。它们不需要（但实际上它们也许会）通过伤害我们来达到目的，但它们会像对待蝼蚁一样对待大多数人，如果我们干扰这些超级智能机器人执行任务的话，它们便会直接对我们动手甚至消灭我们。比如，在未来，一个制造回形针的人工智能机器人也许会为了提取金属成分而将我们的身体磨碎，仅仅因为我们血液中的铁可以用于生产回形针。

总的来说，奇点理论的反对者认为，且不说奇点会不会到来，它的到来究竟是不是一件好事也还是未知的。但无论如何，未来都会发生各种激动人心的事。一个对奇点理论不感冒的人也能看到人工智能迎来一个令人兴奋的未来。保守点儿说，未来的人工智能也将比现在发展得更好。但人工智能究竟能走多远呢？比如，它能最终通过图灵测试吗？在1950年，图灵预言，总有一天，冒充人类的人工智能可以在长达5分钟的沟通测试中骗过30%以上的人类志愿者。虽然至今没有哪个人工智能通过了这个测试，但其实现在很多人经常把程序误当成真人——如果没有人提醒他们在与机器交流的话。

如今，每年在英国的布莱奇利公园（Bletchley Park）都会举办一个图灵测试比赛（届时会有网络同步直播），举办地正是第二次世界大战时图灵破解德军恩尼格玛密码的地方。获胜者可获得勒布纳奖（Loebner Prize）：设计出最接近人类交流行为的人工智能，可获得2000美元；设计出“第一个与人类交流起来毫无破绽，令人无从分辨的”人工智能，可获得25000美元；设计出外表如人类一般，能与人进行口头交流的人工智能，可获得10万美元。

不过迄今为止，还没有人获得25000美元的奖励。严格地讲，目前没有哪一个人工智能骗过30%以上的真人。一个对话程序在2014年的比赛中成功骗过了33%的评委，让他们相信自己是人类，然而评委们都将它当成了一个13岁的乌克兰男孩（这是赛事组织方提供的选项），换句话说，这个程序的英语表达能力欠佳。对话者对它语言上的疏漏和错误都给予了谅解，就像我们在跟外国人交流时也不会斤斤计较，面对外国小朋友时更是如此。

但在这里显而易见的问题是：即使有人工智能通过了图灵测试，那又怎么样呢？我们假设某个人工智能系统有一天真的通过了图灵测试，

甚至通过了完全图灵测试，具有与人一般的感知行为。可是这能证明什么呢？这是否意味着一些计算机真的能像人类一样思考？这能证明它们真的拥有“意识”吗？

事实上，“意识”是一个难以诠释的概念。但我们可以先区分一下功能意识（functional consciousness）和现象意识（phenomenal consciousness）。“功能意识”涉及对诸多心理活动或状态的区分：沉睡与清醒，深思熟虑与不假思索，关心与漠视，易懂的与令人费解的，值得报道的与不值得报道的，善于反思的与不经反思的，等等。

这些意思相反的心理活动都在“功能意识”的范畴内。我们可以确定，机器在信息加工的过程中能理解这些信息，我们可以将其编入运行程序中。（目前，关于机器意识的研究中，最有意思的是LIDA认知系统理论，它建立在一系列已经得到广泛认可的脑科学研究基础之上，重点关注我们上面提到的这些概念。）这么来说，未来一些人工智能的确可能具有意识。一个通过了图灵测试的机器人有可能既会计划也会思考。

现象意识或称感质（qualia）的概念与功能意识截然不同，我们对疼痛的感觉，以及看到红色时的感受，都属于现象意识。现象意识的存在，在这个本质上由物质构成的世界中，是一个非常形而上学的、难以解释的谜。解释“我们为什么会拥有现象意识”，远比解释功能意识要难得多，有时我们也将其称为“知觉难题”。

为了解释现象意识，有些人提出了极为大胆甚至可以称得上疯狂的想法。一些人认为感质与质量、电荷一样，是宇宙的基础。（当然，这种说法实际上也没有真正解释现象意识！）还有一些人尝试用量子力学的知识来解释现象意识，这相当于用一个深不可测的理论来解释另一个深不可测的理论。很多人干脆举手投降，选择放弃。当代一位著名的哲学家曾说过：“不仅没人能知道物质如何才能拥有人的意识，而且也没人能知道我们是怎么产生‘没人能知道物质如何才能拥有人的意识’这一想法的。”简而言之，这就是一个如泥沼般的哲学难题。

可是，如果仅仅因为“人类为什么拥有现象意识是一个难解之谜”，就认为我们没法判定未来的人工智能是否也会有现象意识的话，坦白说，这个结论对你来说或许比较荒谬，对于我来说就太过荒谬了。这还仅仅是直观的感受，不是仔细论证后得出的结论。

许多人工智能专家（如LIDA理论的提出者）跳过了与现象意识相关的问题，因为这真的太复杂了。但仍有少数几位在人工智能领域颇有影响力的哲学家，尝试用信息加工理论对其进行分析。

从一方面来说，感质可以看作程序内部的计算状态，或者人脑内部的虚拟机。它不仅会对我们的行为造成影响（例如影响我们不由自主露出的表情），也会影响我们处理信息的过程（例如，当我们被人伤害后会想着如何反击）。只有结构极为复杂的计算系统可以产生感质（蜗牛

就不可能有这样复杂的神经系统）。系统只有特定的几个部分能够获得感质，因此它们是私密的。更进一步来说，这种我们自发的感受无法用精神结构理论来解释，我们也很难对它进行精确的描述，即它具有“不可描述性”——“你和我对红色的感受是截然不同的，我也没法将我的这种感受完全传给你。”

如果上述推测正确，那么未来有些人工智能也将拥有现象意识。但关于这点，我们仍然没有达成共识。

另外，在“人工智能技术究竟是否有益于我们人类”这一更关键的问题上，我们也还没有达成共识。上文提到的那些奇点理论的拥护者对此当然毫不怀疑，但即使是像我这样怀疑奇点不会到来的人，也要承认人工智能技术在当下很多地方都非常有用，这点在未来也将变得越发明晰，甚至毋庸置疑。

从某种程度上来讲，给人工智能技术贴上“好东西”的标签看上去是正确的。

尽管如此，在各种与人工智能的未来有关的忧虑中，有一些需要我们严肃思考。其中一个最突出的问题就是人工智能对就业的负面影响：留给人的就业岗位（包括专业性强的和一般的）会变少，技术含量低、重复性强的工作会被机器接管。在理想情况下，我们的工作结构会被重新调整，我们会与机器协同工作：人类做仅能由人类完成的工作，剩下的由机器来做。即便如此，许多一直在做技术含量比较低的工作的人在未来会发现工作更难找了。虽然未来将有一些新的工作产生，但这些新工作对从业者受教育水平的要求很可能是大多数人望尘莫及的，即便在发达国家也是如此。

有些人认为就业将不再重要。他们暗示，像“全民基本收入”这样的保障将取代我们的工资，作为公民，我们有获得这笔收入的权利。（许多国家已经开始进行类似的实验或正在草拟计划。）但是，这个方案也存在各种问题。支撑这笔庞大社会支出的税收从哪里来？人们靠做什么来消磨这么多的业余时间呢？社会心理学家已经明确告诉我们，一份工作，即使技术含量不高，它给人带来的也远不只是金钱。

另一个突出的问题，或者说一系列突出的问题，与军事有关。虽然我们早已开始用无人机来投放炸弹，但轰炸目标仍由人类选择。如果未来出现了全自动化的无人机，轰炸目标也由它们来选择的话，那将是一个不折不扣的噩梦。本书中诺埃尔·夏基（Noel Sharkey）的文章将充分讨论这个问题。

另外，大量的人工智能机器人也出现在了一些需要同理心的、面对面与人交流的工作中。人们不断将大笔的资金投入智能维修机器人、陪伴机器人和保姆机器人的研发领域。

如果保姆机器人只是一个对婴儿的哭泣或睡眠模式进行监测，适时

提醒人类照顾者的智能系统的话，那么也还好。但如果它是一个运用了自然语言处理技术的智能系统，既能给孩子们带来欢乐，又能教育他们，那情况就不太妙了。即使只是陪着孩子一起看《小鹿斑比》，它都能引来大问题：当看到斑比的妈妈被射杀时，一个保姆机器人会对孩子说什么呢？

同样，未来老年人家中的护理智能系统（软件或机器人）如果只是为老人做些日常家务的话，那么也还好。但如果它们与老人深入交流，一不小心就能唤起对方的情绪记忆，那它们带来的麻烦就远多于好处了。（不过在理想的未来世界，人们都不会考虑使用这样的智能应用。人们会雇用专业的护理人员，并且尊敬他们，一切都比现在好得多。亲戚朋友探望老人也变得非常方便，年老的你是否期待他们，那就是另一个问题了。）

世界上有许多组织和团体都在思考我们提到的这些问题，试图找到能避免、改善和控制这些问题的实际方法。例如，一个由机器人专家担任主席的国际委员会就在关注军用机器人（例如无人轰炸机）的发展，该组织也提供专家建议；还有监测大数据在各个领域应用情况的人工智能专家团体和政策制定者，他们关注与大数据有关的个人隐私滥用问题。

总的来说，巨变已发生，人工智能技术的许多成果都会极大地提升我们的生活质量，但有一些会产生计划之外的结果，威胁我们生活的重要方面，尽管有时我们有所预料。因此，我们也不能放松对人工智能研究的监管。

量子计算

QUANTUM COMPUTING

文/温弗里德·K.亨辛格（Winfried K. Hensinger）

20世纪80年代初期，传统计算机的流行趋势才初见端倪。那时候，人们的生活与现在大不相同，没有网络和智能手机，火车站里看不到电子售票系统，当时磨炼打字技能的我用的还是老式的机械打字机。事实上，那时候日常事务的运转并不依赖于计算机，许多在今天看来理所当然的东西当初根本就无迹可寻。然而短短40年不到，世界就发生了翻天覆地的改变。现如今，计算机技术已经渗透到了生活的方方面面，甚至让我们开始怀疑没了计算机我们的生活没办法继续。科学界和政界为这种对我们的生活产生广泛而又深远影响的技术专门起了个名字：颠覆性技术。之所以冠以“颠覆性”之名，是因为这样的技术有能力在短时间内给我们的生活带来极大的变革，并且这种变革涵盖生活的方方面面。而在接下来的10～20年，我相信我们将有幸见证另一项颠覆性技术的降临，它就是——量子计算。

不过首先，我们要明确这样的认识：量子计算机并不等同于拥有超快运算速度的传统计算机。事实上，无论是内部原理还是外部功能，它都与传统计算机有极大差异。要是以为量子计算革命就是把传统计算机替换成量子计算机来执行同样的任务以获得更快的速度，那你就大错特错了。量子计算机的真正威力在于，借助它，我们可以去求解一些原本“无法求解”的问题——哪怕使用现在最快的传统计算机，这些问题也要花上几十亿年才能算出答案。量子计算机会赋予我们全新的能力，从而以超乎想象的方式改变我们的生活。要想真正领略量子计算机的神奇，畅想它会对我们的生活带来怎样的变革，我们有必要了解一些基础知识。因此，请允许我先对量子物理做一个简单科普。

什么是量子物理？一言以蔽之，量子物理学是一门试图解释我们所在的世界的理论。这门理论有一些相当古怪的特性。比如，它预言物体可以同时出现在两个不同的地方。是的，你没听错：根据量子物理学的基本原理，我可以一边坐在布莱顿的办公桌前奋笔疾书，一边又躺在佛罗里达的沙滩上惬意地晒着太阳。遗憾的是，这种情况在现实世界中几乎不可能出现在人这样的宏观物体身上（尽管我无比希望上述的情景能成为现实）。但是，对于像原子这样的微观物体，这种名为“叠加”的现象却可谓稀松平常。无数次的实验表明，原子确实可以同时存在于两个不同的位置。物理学家曾对量子物理的这种奇怪特性感到无比震惊，他们设计了大量实验，试图找出理论的破绽从而将其推翻，而实验的结果则一次又一次地让他们哑口无言。

我也曾在学术生涯里与量子物理学的古怪特性打过交道。有位名叫杰拉德·米尔本（Gerard Milburn）的物理学家曾经做出预言，他认为一个原子可以在同一时刻既向前运动又向后运动。为了更直观地理解这个预言背后的思想，你可以想象这样的情景：你走进停车场，发现自己的爱车被另外两辆车一前一后地夹住，而且间隔甚小，你为了把车倒出来而感到头痛不已。在现实世界，你可能遇到这样的麻烦：你小心翼翼地把车往前开了一点，没承想还是碰到了前面的车，于是你慌慌张张地倒退，结果又把后头的车撞了。到了量子世界，你遭遇的麻烦也许就会变成这样：你一启动，就发现自己把前后两辆车同时给撞了——没错，是同时！刚接触这个想法时我还年幼，不过从那时起我就一直对它念念不忘，所以当我正式走上学术道路，拥有实验条件之后，我就自然而然地动了将这个想法实现的念头。经过三年的艰苦工作，在实验室度过了无数个不眠之夜，我和我的同事终于得到了满意的观测结果：原子可以在向前运动的同时向后运动。这就是古怪的量子叠加的一种表现。

不过，你要是以为叠加就是量子物理唯一的古怪之处，那就太天真了！还有一种被称为“纠缠”的现象，它的古怪程度可能犹有过之。量子纠缠的准确阐释绕不开数学公式，不过我会尽量用简单的语言给出一个通俗的描述。量子物理学预言，我们可以通过某些方法使两个微观物体（比如两个原子）纠缠在一起。如此一来，哪怕将这两者隔开很远的距离，并且切断一切可能的信息传递方式，一旦对其中一个原子施以特定作用，另一个原子也会在瞬间受到影响。爱因斯坦称之为“鬼魅般的超距作用”，他对此感到十分不舒服。爱因斯坦提出了实验思路，希望实验结果与预言相悖，从而证明量子理论的不完善。自那之后，物理学家一直在进行着这样的实验，他们不断地提高实验精度，堵上能想到的每一个漏洞。然而六十多年过去了，实验的结果却一次次地让爱因斯坦的支持者失望：量子物理学似乎是正确的，叠加和纠缠之类的古怪现象确实无可辩驳地存在着。

虽然仍有物理学家试图深入研究量子物理的古怪特性，但大多数物理学家已经接受了这一事实，并转而寻求新的挑战。他们开始思考：是否有办法利用这些古怪特性，以它们为基础，发展全新的技术？这方面的想法有很多，量子精密测量就是其中之一。这项技术有望引领新一代传感器的变革，让我们以前所未有的精度对电磁场进行测量。我们甚至能够利用这项技术来感知重力的微弱变化，从而实现地下管道的远程监测。另一项颇被看好的技术是量子加密，它向我们保证如果通信被第三方窃听，我们能够马上发现，而做出这份担保的不是其他，正是物理学定律本身。

所有这些技术都令人兴奋，并且都有可能对我们的生活产生深远的影响。不过，要是让我来选一个最具颠覆性意义（同时也最难实现）的技术的话，那还是非量子计算莫属。现在，就由我来向读者解释这项崭新的技术究竟强在何处。

首先，我要简单介绍一下量子力学这门物理学分支的作用。这门学

科试图解释宇宙中物质的一切属性（颜色、强度、传热、导电）如何通过原子的行为和相互作用表现出来。它还试图解释我们体内的原子通过怎样的行为和相互作用使我们能够看，能够闻，能够感知周遭的世界。由此，量子力学的重要性显而易见。

然而，我们现在面临着一个巨大的难题：量子力学的计算和仿真很难通过传统计算机来实现。事实上，我们真正感兴趣的是那些能够准确描述现实情况的量子力学问题，但在这些问题面前，传统计算机的功能往往捉襟见肘。传统计算机需要为这类问题消耗大量的计算资源，即便是目前性能最强的超级计算机也要一刻不停地运行几十亿年才能算出答案。在某种意义上，我们甚至可以把当今世界上绝大多数科学家的工作概括为“创建高度简化从而能用传统计算机计算的数学模型以模拟实际情况的量子力学过程”。我们不难想象，这种不得已而为之的简化会不可避免地使最终的计算结果与实际情况存在出入。这也许会让我们错过发明新药的机会、合成新材料的机会、认识蛋白质折叠的机会、理解并控制生物学过程的机会，我们或许已经任由无数重大发现从身侧悄悄溜走而全然不知。困扰我们许久的难题也许会被量子计算机终结。量子计算机本身就以量子物理的古怪特性作为根基，所以在精确模拟复杂量子系统方面，它具有天然的优势。你也许会问：借助量子计算机来理解和控制各种物理系统能带给我们哪些突破性的成果？这些突破性成果中最令人期待的又是哪一项？很遗憾，我无法给出明确的答案，因为科学家也才刚刚开始认识这项全新技术。不过，只要认识到宇宙中一切物理系统的所有属性都可以通过量子力学来解释，我相信你也会和我一样，对量子计算机所能创造的无限可能抱以十二分的期待。事实上，借助量子计算机来理解现实是一个前所未有的创举，我们对宇宙的认识以及对生命的看法都极有可能因此而改写。

量子计算机的上述用途已经足够令人兴奋，但它还有第二个重要应用，同样能对我们的生活产生深远的影响。为了让读者更好地理解这方面的内容，请允许我从传统计算机开始讲起。在过去30年里，随着晶体管的体积不断缩小，单个处理器上能够集成的电路数目变得越来越多，传统计算机的计算性能也以大约每18个月翻一番的速度稳步提升，这一现象被称为摩尔定律。这听起来似乎是在说传统计算机的计算性能正以惊人的速度持续提升，但实际情况并没有那么乐观。姑且不论摩尔定律早晚有一天会失效，在一些复杂问题面前，这样的速度仍然远远不够。我可以简单举几个例子：（1）天气的准确预测；（2）收益最高的股市投资选择；（3）一次送出多份货物时的最短路线设计。这些问题所涉及的参数会随着问题规模（例如天气预报覆盖的地区大小和需要送出的货物的数量）的扩大而增加，所需的计算资源也会相应地水涨船高，传统计算机对具有较大规模的此类问题根本就无能为力。

然而，这些问题交给量子计算机或许就能迎刃而解。信息在传统计算机内以二进制形式编码，其基本单位为经典比特，每个经典比特的值或者为0，或者为1。处理器所要处理的一切信息（比如数字）都可以用长度不一的经典比特串来表示。以两位的经典比特串为例，我们可以用

它来表示0到3中的任意一个数字（比如，01表示数字1，10表示数字2）。将这两个二进制数写入计算机的存储器，再送入处理器执行加法运算，就能得到计算结果11（表示数字3）。这个结果同样会被写入存储器中，用于下一步的运算。不难看出，经典计算机的运算操作只能一个接一个地按顺序执行。然而量子计算机却可以摆脱这样的限制。由于量子物理的叠加特性，一个量子比特串可以在同一时刻表示所有可能出现的组合！量子处理器也可以同步执行所有的运算操作！事实上，学术界对量子物理存在多种不同的诠释，其中一种就认为这些运算操作实际上是在不同的平行宇宙中执行的。如果只比较两位的经典比特串和量子比特串，那它们的差异似乎并不明显（量子计算机一次操作四个数字，传统计算机一次操作一个数字）。然而，随着比特串位数的增多，这种差异会急剧增加。十位的量子比特串可以同时表示1024个不同的数字，而一百位的量子比特串可以同时表示1267650600228230000000000000000个不同的数字。想想传统计算机完成一次运算的工夫足够让量子计算机完成1267650600228230000000000000000次甚至更多次的运算，量子计算机的强大可见一斑。

不过先别兴奋，量子计算机有一个重大的局限性我不得不提。虽然它可以同时完成那么多的运算，但这并不意味着我们能够读取所有这些运算的答案。确切地说，我们只能读取其中的一个。你也别忙着泄气，这样的局限性并不会让量子计算机沦为鸡肋，因为我们可以确保得到的答案用到了所有运算结果。所以，量子计算机依然强大，只是为了要让这份强大有用武之地，我们必须给它配上特定的问题——只要一个答案，但这个答案依赖于大量的运算和操作。数据库查询就是一个很好的例子。想象一下，你从某个地方得到了一个重要的电话号码，你需要从一本按姓名排序的电话簿上找到这个号码的主人是谁，那么你得翻多少页才能找到答案呢？平均而言，半本。如果运气足够好，你可能没翻几页就找到了那个号码，但要是时运不济，等你找到时或许整本电话簿都已堪堪翻完。因此，采用经典的搜索算法，你往往需要翻完半本电话簿。解决这类难题恰恰是量子计算机的拿手好戏，在合适的量子搜索算法的帮助下，量子计算机可以大大缩短查询的时间，这方面的研究已经取得了令人振奋的结果。事实上，开发适用于量子计算机的算法已经成为一个新兴的研究领域，我们在这方面才刚刚起步。令人鼓舞的是，研究人员已经找到了许多性能卓越的量子算法。

你可能要说，量子计算机有多厉害我已经见识到了，但你们要怎样才能把它制造出来呢？很遗憾，这件事的困难程度超乎想象，以至于在概念提出之后的几十年里，许多科学家甚至认为这根本无法实现。然而，随着近年来科学和技术领域迎来许多突破，科学家的态度已经发生了改变。根据目前的情况，我们可以断言，凭借现有技术，我们完全有能力制造出量子计算机。然而，这个目标就像载人登陆火星一样复杂且艰巨，无数工程难题横亘在前，留待我们逐个攻破。不过先别管那么多，我们来看看制造量子计算机究竟需要哪些技术。

一台量子计算机最重要的组成部分无疑是能够呈现量子效应的物理系统，因为量子叠加和量子纠缠是这台机器能发挥作用的基本前提。好消息是，我们在这方面享有一定的灵活性，因为原则上任何物理系统都能够呈现量子效应。量子计算机的设想提出之后，各路科学家纷纷建言献策，提出了大量的候选方案，包括光子方案、离子阱方案、超导电路方案、液氦上电子方案、含杂质的硅晶体方案，等等。针对这些方案在量子计算机方面的可行性，科学家们展开了深入细致的研究。

上述系统确实都能呈现量子效应，困难的地方在于如何控制它们，让量子效应的发生符合我们的需求。虽然在观测量子物理的古怪预言方面，物理学家经验丰富，但说到控制这些效应，他们依然是不折不扣的新手。为什么这项技术会这么困难呢？部分原因在于任何形式的扰动都会立即将这些量子效应破坏（这也是我们看不到像人这样的宏观物体同时出现在两个不同地方的原因）。许多科学家仍然在对各种各样的候选系统进行研究，它们之中或许会诞生未来量子计算机的完美架构。但是，目前脱颖而出的方案只有两种，它们取得的进展令人瞩目，我们由此坚信，大规模量子计算机的问世已经不再遥不可及。

其中一种方案利用了名为超导的量子现象，这要求量子计算机必须冷却到接近绝对零度（-273℃），否则无法正常使用。如果只涉及几个量子比特，那么这项工作可以轻松完成，但是一旦量子比特的数目增至几十亿个，工程设计就将面临极大的挑战。

另一种方案关乎离子阱，它可以在室温环境或者-196℃（氮气的液化温度）的“适度”低温环境下正常工作。目前，量子计算相关研究中的最佳成果便是由离子阱系统取得的。仅仅几个月之前，在来自谷歌公司、丹麦奥胡斯大学（Aarhus University）、德国锡根大学（University of Siegen），以及日本理化学研究所的多位杰出科学家的帮助下，我所在的萨塞克斯大学（University of Sussex）的科研团队发布了世界上首个基于离子阱系统的大型量子计算机制造计划。这项计划已经在萨塞克斯大学的实验室里开始了正式的工程运作。

我们现在就来看看离子阱量子计算机的工作原理。在这样的一个系统中，离子由电磁场捕获，约束在特定的区域，每个离子在功能上都相当于一个量子比特。我们需要确保离子所在的环境接近完美的真空环境，这样它们就不会和系统内部的其他粒子发生碰撞或相互作用。捕获离子的电磁场由部署在专门设计的微芯片上的一系列电极提供，这些电极纵横交错，形成一个巨大的迷宫，与经典游戏《吃豆人》的地图颇为形似。通过改变电极上的电压，我们可以让这些离子沿着迷宫的路径移动。执行运算操作时，只要让相应的离子从存储区域移动到量子逻辑门区域即可。这些量子逻辑门的实现通常要借助以微米级精度对齐的成对激光束。但是，为了完成运算操作，系统所需的成对激光束的数量十分庞大，与系统所含离子的数目相差无几。因此，尽管在离子数目较少的情形下，这项技术的可行性已经得到了验证，但谈到设计并制造能够容纳几十亿对激光束，满足同等数目离子需求的大规模量子计算机，我们

前方的道路似乎依然困难重重。

幸运的是，我们最近发明的新方法实现了突破，我们成功地通过在微芯片上施加电压的方式实现了原本只有成对激光束才能实现的功能，这就使得建造大型量子计算机的难度大大降低。事实上，我们已经规划好了建造大型量子计算机的蓝图，全面概述了所需的工程任务。在这份蓝图中，我们仅仅依托现有的科学技术，完全不依赖假想中的未来物理学突破，所以我们有信心向世人宣布：我们此时此刻就已经具备了建造大型量子计算机的能力。不过也正因如此，我们计划中的这台量子计算机还远未达到它潜在的最佳性能，它会有很大的占地面积（一栋楼甚至一个足球场那么大），非常高昂的造价，并且谈到它的最终面世，我们还需等待10～15年的时间。但不管怎样，在我们前方的道路上已经没有了与物理原理相关的明显障碍。或许你仍心存疑虑，觉得即便制造出了这样的量子计算机，它的庞大体积也使它难以进入寻常百姓家。诚然，我同意你的观点，不过这并不是个大问题。毕竟世界上第一台传统计算机也没小到哪儿去，也需要整栋楼的空间才能安放妥当。另外，我们实际上可以只在一定地域范围内部署一台量子计算机的主机，让用户手持终端对其进行远程访问，以获取计算资源，这样的方式在现今的云计算时代不仅可行，而且更为自然。

那么在量子计算的商用道路上，我们现在已经走了多远呢？有一家名为D-Wave的加拿大公司迈出了大胆的一步，该公司将其产品冠以量子计算机之名推向了市场。许多物理学家对此持怀疑态度。不过最近的研究似乎证实了确实有某些量子效应在D-Wave计算机的运行过程中发挥着作用。不过，我并未看到任何证据表明这款产品有可能“进化”成为通用量子计算机。也就是说，D-Wave计算机与本章介绍的有望彻底颠覆我们生活的量子计算机并不是同一回事。这是因为，和基于离子阱这类系统的量子计算机相比，D-Wave计算机使用的量子比特在功能方面有所欠缺。因此，D-Wave计算机只能被视作可用于执行特定任务的专用计算机，而无法进一步演化成为通用量子计算机。虽然这听上去让人有些失望，但是D-Wave计算机仍然有可能在某些专门领域大放异彩。

制造大规模通用量子计算机相当于夺取科学界的圣杯，因此越来越多的高校加入了研发量子计算机的行列。与此同时，量子计算的商用前景也十分广阔。除了IonQ这样的初创企业，IBM、谷歌和微软等许多老牌名企也都对量子计算表现出了浓厚的兴趣，因为它们已经意识到，能否掌握这项技术或许关乎公司的存亡。可以说，制造量子计算机的道路上已经不存在难以逾越的障碍，但是我们面临的工程挑战依然严峻。距离第一台大规模量子计算机的问世可能还有10年或者20年，而在此期间，我们无疑会见证一系列技术成果的诞生。总而言之，这项全新技术也许会给全世界带来翻天覆地的变革，能够亲历这一盛事的我们何其幸运！

第四部分　制造的未来

MAKING THE FUTURE

智能材料/能源与未来/未来交通/机器人技术

智能材料

SMART MATERIALS

文/安娜·普洛萨伊斯科（Anna Ploszajski）

想象一下，要是你拥有的物品可以自动地感知、反应、移动、适应、变形以及自我修复，完全不需要人为操控，那你的生活将会产生怎样的变化？你的想象在不远的将来或许就会全部成为现实：不需任何操作，你的物品就会自动为你执行各种功能。这项技术实现的关键不是机器人技术和电子技术，而是智能材料。这是一类特殊的固体材料，在光照、温度、湿度或外力等外界作用下，它们的颜色、形状或磁性等属性会自发改变。这是一个充满无限可能的领域。我们或许可以在有生之年看到融入日常生活的智能材料：人形机器人的皮肤，可穿戴的显示设备，调节建筑物温度的变色屋顶，甚至能够自己打开的水果罐头，智能材料的神通妙用将会完全颠覆你的现有认知。

智能材料其实并不是科学家的新发明。事实上，大自然早就已经向我们展示了智能材料的神奇之处。想想一到下雨天就自动闭合的松果，还有无论种在什么地方都会向光生长的植物，你就理解这句话的意思了。而且，就算只是回顾人类自己的历史，智能材料的使用也不是件新鲜事：古埃及人在4500年前修建了吉萨金字塔群，他们在金字塔上涂抹的砂浆就有一定的自我修复功能。但是，科学家第一次明白无误地认识到智能材料的存在，要追溯到1880年。这一成果要归功于皮埃尔·居里（Pierre Curie）和雅克·居里（Jacques Curie）兄弟二人。顺便说一句，皮埃尔的妻子，雅克的弟媳，就是大名鼎鼎的玛丽·居里（Marie Curie）。他们在实验中发现，当石英晶体（提取自花岗岩的常见透明矿物）受压时，其上下表面之间会形成电压。仅仅过了一年，他们就进一步证明了这种效应是可逆的。也就是说，对石英晶体施加电压，就能够使其变形。兄弟俩将希腊单词piezo（挤压）和elektron（琥珀，古希腊人用其制备电荷）组合在一起，将这种现象命名为piezoelectricity（压电效应）。以石英为代表的压电晶体首次投入实际应用是在第一次世界大战期间，它是声呐探测器的重要组成部分。时至今日，压电晶体的应用愈加广泛，从打火机到麦克风，再到钟表和超声成像，它们的身影可谓无处不在。

皮埃尔和雅克的突破性研究激发了许多材料学家、工程师和发明家的灵感，他们开始重新思考自己的材料设计方法，并最终发现了一系列全新的智能材料，数以百万计的专利发明的诞生受益于此。目前已发现的智能材料，其功能可大致分为六类：变色、感知、变形、加热/冷却、相变（凝固或熔解）以及自我修复。这些材料绝不是科幻小说中的天方夜谭，也不是仅存在于实验室的黑科技，它们已经渐渐走进了我们

的生活。如果喜欢浏览购物网站，你或许已经与它们不期而遇过——日光照射下颜色变深的光致变色太阳镜，还有一倒入热饮就改变颜色的热致变色马克杯，这就是智能材料在实际应用中的两个典型例子。

未来，在智能材料的帮助下，你的骑行体验将更加轻松愉悦。道路将始终平整如新，再也不会坑坑洼洼，而你的自行车将彻底跟爆胎和剐痕挥手告别。你不必再为天气烦恼，因为你的衣服可以快速适应环境和你的体温，哪怕下雨也无妨。天都黑了还没来得及回家？没关系，来往车辆会让道路发光，照亮你的归途。不小心摔倒在地，划破了衣服？没关系，就算被撕得粉碎，你的衣服也能当场自动修复，转眼就恢复如初。

如果想去更远的地方旅行，你需要一架未来飞机。不过，和现在的飞机相比，未来飞机更像是一只鸟，它会主动根据飞行条件改变自身外形，从而为乘客提供极致平稳的航行体验。与此同时，未来飞机还可以使用更少的燃料获得更快的飞行速度，而这一切都要归功于智能材料的运用。这就是智能材料构筑的未来世界，你准备好迎接它了吗？

未来自行车

为了让顾客每隔一段时间就为同样的产品再次掏钱，现在的厂商往往会采取两种不怎么光明的手段：实行计划性报废，令产品无法修复。后者的含义不言自明，前者是指厂商故意为其产品设计有限的使用寿命，以加快用户的更换频率。当今社会，消费主义与一次性产品大行其道，厂商所采取的这两种手段可谓“功莫大焉”。在这样的时代背景之下，自行车可以称得上是个例外。所有的自行车都遵循同一套设计思路，所有零部件都可拆卸替换，已然接近完全可修复的产品。然而，即便如此，任何一辆自行车最终都会因斑驳的剐痕、瘪下去的车胎，以及锈迹斑斑的部件而报废，无论用户怎么悉心呵护也无法改变这个结局。但是到了未来，一切都将不同，智能材料将帮助我们的自行车摆脱变成废品的宿命。

自行车的车身可以涂覆一层自修复涂料，这种涂料的内部含有大量包裹着树脂修复剂的小球。一旦车身被锐器剐到，出现剐痕，这些小球就会裂开，释放树脂修复剂，将剐痕填满，从而实现自我修复。自修复轮胎则可以用特制的硫化橡胶生产。组成这种橡胶的高分子长链的边缘被带有电荷的原子或原子团修饰，因此相邻分子上带有异号电荷的部分就会彼此吸引形成强化学键，从而令材料具有坚固耐用的宏观性质。如果橡胶破裂，化学键遭到破坏，分子也可以自发聚合形成新键，其依赖的仅仅是异号电荷相互吸引这一简单的物理事实。目前市面上的防扎轮胎只是在胎面下增加了一层黏性的填隙材料。一旦出现穿孔，这种填隙材料会迅速将其封住。但它和我们介绍的自修复轮胎并不是一回事，后者采用的智能橡胶是能够不断将自身密封的单一成分。

要是把现在的自行车停在室外任其经受风吹雨淋，那么用不了多久，暴露在外的零部件就会开始生锈。因为锈蚀的出现会让金属表面的碱性增强，所以智能显色材料在这种时候就有了用武之地。这类材料就像高中化学实验课上常用的石蕊试纸一样，会随环境pH的改变而呈现不同颜色。比较常见的是含有酚酞的显色材料，它会在碱性条件下变成粉色。从自行车零部件到桥梁钢筋，显色材料可以涂覆于所有可能发生锈蚀的物体表面，有了它我们就能在锈蚀发生早期进行识别，从而准备好应对方案，避免更严重的损失。

美国国家航空航天局在这方面更进一步，这里最新研发的智能防锈蚀涂料不仅有识别功能，其内部所含的微囊体还会在碱性增强时释放出油性抑制剂，从而阻止锈蚀进一步发展。如果未来的物品都拥有自动防锈蚀的能力，那么整个国民经济都会大大受益——你可能想象不到，英国每年因锈蚀造成的损失多达600亿英镑（约合5340亿元人民币），占到GDP的3%。

或许再过不久，我们感谢皮埃尔和雅克兄弟的理由又会增加几条。这是因为科学家为他们发现的智能压电材料找到了新的应用场景：为街灯、路标和交通信号灯提供电力。目前最常见的压电材料是一种名为锆钛酸铅的人造陶瓷。这种材料之所以能在受压时产生电压，是因为其内部原子排列形成了非对称的晶体结构。说到晶体，可能有些人会联想到水晶那样闪闪发光的宝石，但其实这只是个科学名词，表示内部基本单元按一定规则有序排列并形成重复三维结构的固体材料。包括水晶在内的绝大多数宝石都属于晶体，但除此之外，金属、陶瓷、冰、岩石以及一些塑料也同样属于晶体。多数晶体的基本重复单元是对称的，无论是上下颠倒还是旋转180°，它们看上去都不会有什么不同。但压电晶体不一样，它们的基本重复单元不是对称的。通常情况下，压电晶体内部原子所携带的正负电荷会相互抵消。然而一旦受到挤压或拉伸，压电晶体内部的非对称重复单元就会变形，改变正负电荷的分布，使它们无法相互抵消。于是，重复单元的一侧会带有更多正电荷，另一侧带有更多负电荷。压电晶体内部有数百万个重复单元，其中的每一个都会产生这样的效应，不断累加之后就会出现宏观可测量的电压，这就是压电效应的微观机理。接下来，我们只需要将压电晶体接入电路，就能把这种电压转化成有用的电能。在未来，我们给道路铺沥青前可以先铺设一层压电晶体。这样一来，车辆驶过路面时就能压缩晶体使其发电，电能可以存储在电池中以备路灯照明之用。针对这种系统的几次试验均取得了不俗的成果，它的前景值得期待。此外，这项技术的应用范围可以进一步拓宽，我们可以将压电晶体嵌入车胎和鞋垫，从而将原本会浪费掉的动能转化成电能。

地方政府的要员以及有车（不管是汽车还是自行车）一族大概会对未来的道路状况十分满意，因为在自修复混凝土的作用下，他们再也不用担心路面坑坑洼洼了。自修复混凝土是一种能够检测自身残缺并且自动修复的智能材料。它的内部掺入了特殊成分，开裂时这些成分就会暴露在外，雨水或者大气中的水分会将其激活，催生出新的建筑材料填补

裂缝。这种特殊成分的一个例子是含有休眠活菌和乳酸钙的黏土添加剂。你可能是头一次听到乳酸钙这个名词，不过你说不定已经见过它的真身了：把熟化干酪在冰箱里放一段时间，它表面析出的那层白色晶体就是乳酸钙。添加剂中的休眠细菌遇水会重新活化，它们以乳酸钙为食，然后排出石灰石填补裂缝以防止路面进一步损伤。这种自修复混凝土材料可用于建设道路、高楼以及其他一切基础设施，尤其是在地震频发地带它能起到的作用简直不可限量。

骑自行车的时候我们会希望衣服干爽透气，以免出汗后贴在身上令人难受，但同时我们也希望停止骑行时，衣服能够拥有卓越的保暖性能。天底下能有这样的好事吗？还真有。提供解决方案的是一种名为形状记忆聚合物的智能材料。聚合物的基本构造单元是成百上千个原子通过共价键连接形成的长链状分子。橡胶、塑料以及蛋白质等都属于聚合物。顾名思义，形状记忆聚合物的特殊之处在于它的形状记忆功能。这种材料会“记住”自己最初被制造出来时的形状。如果我们在材料温度高于某个值（转变温度）时令其发生形变，那么在它逐渐降温的过程中，这个形状就会固定住。再次被加热到转变温度后，它会快速弹回至最初记忆的形状。未来的骑行夹克或许会在内部增加一层由形状记忆聚合物制成的蓬松衬里，当皮肤温度较低时它会像睡袋一样捕获空气，从而提供卓越的保暖性能，而当你骑了一段时间，身体微微发热时，它会收缩以加速热量散发。

除了对温度敏感的形状记忆聚合物，事实上我们还有对湿度敏感的形状记忆聚合物。这种聚合物在环境干燥时十分坚硬，但一接触水就会软化。我们可以用这种聚合物制造衣料上的微鳞片。干燥时，这些鳞片会垂直伸出，从而使衣物拥有良好的透气性，而在下雨时，软化的鳞片会平躺下来，交叠形成密不透水的防护层。

我们对皮肤的自愈特性肯定不陌生。如果不小心从自行车上摔下来擦破了皮，你不会太过担心，因为你知道几天之后伤口就会自动痊愈。未来，在自修复织物的帮助下，我们的衣服也将拥有同样的特性：不小心撕裂了衣服，你只需要往上面倒一些水，然后揉搓几下，再次展开时你就会发现它已经完全恢复，整个过程用时不到一分钟。这样神奇的效果都要归功于这种织物含有的一种特殊蛋白质。这种蛋白质最初发现于鱿鱼的吸盘“牙齿”中，现在已能够在实验室里人工合成了。在水和压力的作用下，它可以快速形成新的化学键，从而实现自我愈合的效果。所以，下次你骑车时不小心把裤子绷开，它就可以当场修复了，但愿这种尴尬给你带来的自尊心伤害也能快速痊愈。

未来飞行器

五百多年前，达·芬奇受鸟类的启发构思了人类历史上的第一架飞行器，这甚至比自行车的设想还早了几百年。在他的构思中，机翼由铰接在一起的木头加上丝绸构成，能够像鸟类的翅膀一样扇动。我们今天看

到的飞机虽然还保留着达·芬奇飞行器的双翼结构，但机翼却是刚性的，只有少数几个部件可以受限地活动。展望未来，智能材料能让我们摆脱当前飞机设计的这种不灵活性，将我们带回达·芬奇最初的设计思路，制造出强健、灵活，能感知环境并自行适应的新一代飞行器。

在飞行过程中，飞机不得不承受不同方向、不同大小的外力，传统的固定翼结构不可能时刻确保自己处于最佳构型。而未来飞机的机翼可以展平或隆起，从而最大化机翼的升力，并且可以根据飞行阶段的不同在折叠、延展、扭转或者紧缩于机身两侧等构型之间自由切换。这些实时的调整可以减少阻力并增加机动性，从而缩短起飞距离，并且在不同的飞行条件下始终保持最佳的气动特性。这将缩短航行时间，减少燃料消耗，为乘客提供更舒适的搭乘体验。

要想让这样的未来飞行器真正出现，我们需要各种智能材料通力协作。让机翼活动的执行机构要由形状记忆合金制成，比如镍钛合金，当温度升高或降低时，它可以在两种预设的形状之间来回变动。轻量级可变形材料的重要性同样不可小觑，这种材料的一个例子是电活性聚合物，对它施加或撤除电压时，它分别会膨胀和收缩。飞机的蒙皮则非形状记忆聚合物不能胜任，它可以从能够承受巨大气动力的刚性结构迅速切换为能够满足机翼变形需求的柔性结构。

许多智能材料还能同时起到传感器的作用，比如，压电晶体和电活性聚合物受到应力时会产生可测量的电信号。此外，光纤的折射率会随温度的升降或外力的施加而改变，因此它们不仅仅是能够嵌入飞机内部结构的坚固轻质复合材料，还是能够监测飞机在飞行过程中出现的损坏、裂缝和动态应变的传感器。这种材料不仅可以应用于飞机，还能应用于建筑物甚至柔性电子设备。通过收集这些材料传递的信号，我们能了解结构内部存在哪些潜在的故障点。

利用量子隧穿复合材料，我们能够赋予未来飞行器人类级别的触觉灵敏度。这种材料由包含微小镍颗粒的橡胶基质构成。橡胶基质是绝缘体，因此当这种材料处于非激活状态时，相距过远的镍颗粒无法使其导电。然而，我们可以压缩材料将其激活，缩短镍颗粒之间的距离，使电子有可能以隧穿的方式在绝缘体内部穿行，从而使材料具备导电性。什么是隧穿？根据量子力学，我们无法得到电子位置的精确坐标，只能给出它处在不同位置的概率。因此，当镍颗粒中的电子接近绝缘体的势垒时，即使能量不足，它也有一定概率穿过势垒，这一概率虽然不大但确实存在。基于此前提条件，只要有足够多的电子试图穿越势垒，最终必然会有一部分幸运的电子成功地出现在势垒的另一侧。NASA已经将这种神奇的材料应用于最新研发的机器人，用于感知抓握物体时的松紧程度。除此之外，这种材料还可用于制造新一代触摸屏和残疾人士的假肢。

智能材料的遗留问题

本文谈到的所有智能材料的有效性都已经在实验台上得到了验证。然而，如果要走出实验室，走进我们的日常生活，它们还有许多问题需要一一解决。在许多情况下，它们的响应不够迅速，材料的结构强度和稳定性有所欠缺，刺激阈值难以精准调控，部分材料有毒性，性能会随着时间的推移而下降。此外，如何将它们整合进工作装置中也是一项艰巨的挑战。最后，与许多新兴产业一样，昂贵的成本、对高端装备制造技术的需求，以及原材料的短缺都阻碍了智能材料的大范围推广。

然而我乐观地相信，在科学家的不懈努力下，这些问题最终都会得到解决。到那时，智能材料有望像互联网改变我们与信息的交互方式那样，彻底改变我们与物质世界的交互方式。我们把物品定义为受到摆布后不会产生自己想法的东西。每一样智能材料孤立地看都符合这样的定义，它们顶多会按照开/关指示在两个状态之间来回切换。然而，一旦将各种智能材料组合在一起，我们就会得到一架能够自我组装、自动修复、产生并存储能量、感知自身状态与周围环境并加以适应，甚至与同类“交流”的飞行器。突然之间，它仿佛从死物变成了生命体。

因此，智能材料向我们抛出了一系列值得思考的问题。它们一定能引领我们走向更美好的生活吗？如果生产、使用、回收智能材料需要消耗更多的宝贵能源和稀缺资源，那么我们为追求生活的便捷性而一味地将简单物品复杂化的做法是否正确？即便事实证明这一做法并不会消耗更多的能源和资源，这就算皆大欢喜了吗？也不是。自修复智能材料的使用将大幅延长产品的使用寿命，这对制造业和贸易业无疑是个巨大的挑战，我们的经济体系如何才能顺应这一变化？智能材料在未来是否会成为权贵阶层的专利？当我们对智能材料带来的自动化生活形成极度的依赖时，我们是否还能进行批判性的独立思考？工艺品诉说着人类的历史，这些代表当今顶尖技术的智能材料终有一日会被当作历史文物收纳进博物馆，到时候它们会对我们的后人讲述怎样的故事呢？

在我看来，智能材料带给全世界民众的积极意义远远超过其潜在的负面影响。未来飞机所需的材料与技术可以用来制造能够感应和自我修复的脑控假肢，为残障人士带来福音。如果自适应衣物和自修复设施能够减轻环境恶劣地区居民的生存压力，那这些技术就值得我们去追求。我们与材料的关系是复杂的，它既与我们的个人观念密切联系，也映衬着特定时代的流行思潮。当我们离开人世时，我希望这些智能材料记录下的我们是敏锐的、坚韧的，能够在变幻纷扰的环境中始终屹立不倒，就如同它们自身那样。

能源与未来

ENERGY

文/杰夫·哈迪（Jeff Hardy）

我得承认一件事情，其实我是个狂热的能源问题爱好者。不管是从运动中收集能量这样的前沿科技，还是大家已经司空见惯的燃气锅炉，都能使我兴奋不已。这一爱好让我显得与众不同。许多人并不觉得自己与能源之间有多么直接的关系，他们仅仅将能源视作一种必不可少的服务。他们支付电费，这样一来，他们每次打开开关时，电力公司就得负责把灯泡点亮。然而，就是这件你认为理所当然的事，对于发展中国家的20亿人而言，却仍是一种奢望。未来我们和能源的关系与今时今日相比肯定会有巨大的不同，这是因为包括气候变化在内的一系列因素制约着我们对能源的使用。未来充斥着不确定性，但我们至少能确定一件事，那就是能源问题——尤其是寻找不受限制的清洁能源——将成为未来人类不得不面临的一项严峻挑战。与其对未来的不确定忧心忡忡，不如欣然接受它。我相信通过本文的介绍，你会对能源的未来充满期待。

能源和温室气体

看过前面那篇关于气候变化的文章之后，你应该已经知道减少全球温室气体排放的重要意义。根据国际能源署的研究，在能源的生产使用过程中排放的温室气体占据全球总排放量的2/3。鉴于这一巨大比例，我们在制定减排政策时，能源问题必然是需要考虑的重中之重。

那么，我们要如何减少与能源有关的碳排放呢？有一个看似简单的解决方案：停止使用化石燃料。这个方案真的实施起来无疑困难重重，因为没有化石燃料就没有现代化的生活，它们是我们生活的动力来源。让大家发扬吃苦耐劳的精神，忍受禁用化石燃料带来的不便利，等待科学家找到可行的替代方案——这样的提案显然不会得到支持。此外，对于那些能源供应受限的国家以及整体经济建立在化石燃料基础之上的国家，这样的提案将使它们的发展停滞不前。因此，我们需要一系列循序渐进的方案以逐步降低人们对化石燃料的依赖。

第一个方案是让能源利用更加高效。要想减少温室气体排放，我们最先想到的代价最小的方法就是尽可能减少化石燃料的使用量。在英国以及世界其他地方，有大量的能源被浪费。电力在生产和传输过程中会损失2/3的能量。另外，如果房间隔热效果不佳，热能也会迅速散失。那么问题来了，既然节约能源有那么多好处，如果这难度不大，那我们为什么没有在这方面做得更好呢？部分原因在于大多数人对提高能源利

用率这件事并不感兴趣，政府出台的一系列优惠政策也无法令他们心动。此外，这里还存在另一个问题：能源利用率的提高可以帮助人们省钱，而这会导致某种反弹效应，他们往往会把省下来的钱用在其他消耗能源并产生温室气体的活动上，比如消耗更多天然气让房间变得更暖和或者乘飞机去国外度假。

第二个方案是让能源系统的运行方式更智能。目前多数能源系统的运行都基于供应紧跟需求的方式。这一特点在需要始终保持供需平衡的电力系统中尤为明显。为此，电力系统采用了多种具有不同优先级的技术，有的持续运行（比如核电和煤电这种基本负载）、有的选择性运行（比如太阳能发电和风力发电）、有的灵活选用（比如燃气发电），还有的仅在高峰时段运行（比如可以快速启动但价格昂贵的柴油发电）。想想看，当你为了洗衣服按下洗衣机开关时，究竟会发生什么？为了满足你的需求，发电站的工作人员需要启动一个新的发电设施或者让运行中的某个发电设施提高功率。在用电的高峰时段（比如很多人都选择在这个时间洗衣服），为你提供电力的很有可能是化石燃料（燃气发电或柴油发电）。这就是现有能源系统运行方式的弊端，而智能能源系统则采取需求跟随供应的方式。在上述例子中，洗衣机这回不会立刻开始工作，它会让你选择：“你最晚什么时候需要洗干净的衣服？”这样一来，只有当存在可用能源时，你的洗衣机才会开始工作（但不会超过你设置的截止时间），这意味着发电站无须启动额外的发电设施。

第三个方案是用温室气体排放量较低甚至为零的其他燃料或技术替代化石燃料。

在供电领域，我们可以将低碳能源作为化石燃料的替代品，比如核能、风能、太阳能以及生物质能（从木材或其他植物中获取的能量）。

另一种方法是使用碳捕集与封存技术。我们可以在发电站附近修建大型化学工厂，捕集该发电站排出的废气中的大部分二氧化碳。这些二氧化碳随后会通过管道输送至废弃的油田或天然气田，从而实现理论上的永久封存。如果发电站使用的不是化石燃料而是生物质燃料，那么通过碳捕集与封存技术我们甚至可以得到负的碳排放！这是因为树木在生长过程中会吸收大气中的二氧化碳，所以将其燃烧之后捕集二氧化碳的做法实质上相当于减少了大气中的二氧化碳含量（只要我们补种上新的树木）。但并非所有的生物质燃料都是碳中和的，它们的生长方式、收获方式、补充方式、运输方式，以及使用土地的方式都会对最终的结果产生影响。

在供暖领域，我们有多种不同的选择。目前人们取暖的方式主要是燃烧天然气。所以，为了减少碳排放，我们可以将天然气替换成对全球变暖影响较小的其他燃气。例如，我们可以用生物质制备生物气，与直接开采天然气相比，这种方法产生的温室气体净排放量更低（只要上一段所论及的影响因素都能得到妥善处理）。此外，我们还可以使用氢气。氢气燃烧的产物是水，因此它是一种非常清洁的能源。但问题是，

当前主要的氢气制备方法还是需要用到天然气，这种名为天然气蒸汽转化的方法在运行过程中仍会释放二氧化碳。我们也可以通过电解水来获得氢气，然而为此我们需要铂和钯这类昂贵的材料，而且要支付电费，过高的成本使这种方法难以大规模推广。

在交通领域，化石燃料的统治性地位无可动摇，至少目前还是如此，未来我们也许会转为使用氢气。虽然电动汽车和混合动力汽车越来越受大众欢迎，全球的销售量已超百万辆，但这和使用化石燃料的汽车相比仍是九牛一毛。我们习惯了让汽车在装满油的情况下行驶数百千米，然后在几分钟之内再次把油加满。尽管汽车电池和充电桩的性能正在不断提升，但距离满足我们的期待它们还有很长一段路要走。

最后，我们的行为习惯也有着重要影响，这点在交通领域尤为明显。今天，英国人有5%的时间花在了使用汽车上。随着自主汽车技术、虚拟会议技术、智能公共交通系统，以及城市自行车道规划各个方面的进步，或许在不久的将来，我们的出行方式会彻底改变。

科技爆发

能够取代已有技术或者创造新的产业从而撼动整个市场的技术，我们称之为颠覆性技术。在能源领域，颠覆已经开始。

首先，我们使用的产品正在变得越来越高效。自从使用能效标识和产品标准以来，欧洲节省下的能源量之大，相当于意大利全年的消耗量。举个例子：曾经家家户户都有的白炽灯正在逐渐被LED灯取代，后者的能耗只有前者的1/10。智能科技也在帮助我们提高日常生活中的能源利用率，比如，智能恒温器可以学习我们的能源使用习惯，从而优化家庭供暖模式并节约我们的资金（当然，这同样会导致前文提到的反弹效应）。

同时，能源技术的价格也日趋平民化。随着全球装机量的持续增长，太阳能光伏设备的价格正变得越来越容易为大众所接受。这种设备有一个关乎普及的因子约为21%，也就是说它的销售量或者装机量每增加一倍，价格就会下降21%。现在，全球太阳能光伏装机量已经达到了300千兆瓦，而在十年前，这个数字才刚刚接近10千兆瓦。（做个简单说明，我家里的电器全部打开的话大概需要10千瓦的功率，1千兆瓦等于100万千瓦，这意味着目前全球的太阳能光伏已经可以在高峰时段同时为3000万栋住宅提供电力。）这项技术将会催生出大量的“产消者”，他们一边消费电力，一边生产电力。可以预见，如何在家庭中存储电力将会成为下一个重点攻关课题。

无处不在的数据

我们越来越清楚地认识到，这个时代是属于“大数据”的时代。不管

是我们的智能手机和智能手表，还是周围的传感器以及蓬勃发展的物联网，所有的一切都在收集并传输数据。我们利用大数据来改善产品营销，预测地震，督促健忘的病人服用药物。

将数据（不管是不是大数据）与机器学习（利用数据进行学习并做出预测的算法）相结合，可以产生大量与能源相关的应用。这项技术已被证明可用于优化流程从而降低各种系统的能源需求，例如超市的冷藏系统和数据中心的冷却系统。然而除此之外，该技术或许还能成为未来能源供需关系实时智能优化的关键，因此它还有更大的潜力留待进一步的开发。

这场科技大爆发的最后一块拼图便是高度安全的点对点交易技术的问世。近年来吸引了无数人目光的比特币，其基础是一种名为区块链的技术。利用区块链技术（或者其他相似技术）搭建分布式记账系统，可以在不依赖银行这类中心机构的前提下完成各方之间的交易，并且保证这一过程的安全性。这项技术同样可以在能源领域发挥重要作用，利用它我们可以安全地实现点对点能源交易。例如，我可以把我的太阳能光伏板产生的电力直接卖给邻居而无须中间商介入。

世代联系

变化的不只有技术，还有我们自己。我们与能源的关系会朝什么方向改变？这很可能与我们未来的态度、价值观和行为习惯相关。不同世代之间的差异已经显现。

Y世代也被称为千禧世代，他们出生于20世纪70年代末至90年代。他们思想开明，对包括互联网在内的各种技术十分了解。调查显示，移动技术已经成为Y世代人群生活中必不可少的一部分。而且，和前几代人相比，他们对太阳能光伏等分布式能源技术的兴趣更高。因此，他们很可能乐于看到能源领域出现颠覆性技术。

Z世代出生于互联网时代，这一时期智能手机大范围普及，社交媒体大行其道。但与此同时，在他们成长的时期，全世界都在面对金融危机以及不断增加的安全威胁带来的困境。调查显示，Z世代的人群务实勤奋，具有高度的社会责任意识和环境责任意识。他们能够很好地适应变化与创新，期待来自世界各地的便捷服务和即时通信。

掌握推动变化者的信息很有帮助，从中我们能了解人类与能源的关系在未来会如何演化。从上文已经考察过的一些趋势分析，未来能源或许将会与我们每个人密切相关。接下来，我会从几个侧面对Y世代和Z世代未来的人生历程中可能出现的情景做一番畅想，为这个话题增添几分趣味。

智能生活

想象一下，未来的你是一名商务精英，每一分每一秒都弥足珍贵，为此你把一切日常事务都外包给了一家名为“生活后盾”的公司。只需要每月结账，这家公司就会为你提供衣食住行的全方位服务。公司还为你配备了一位智能机器人管家，它可以与你对话，甚至可以帮你订购商品。检测器和传感器遍布你的住宅，为你提供最舒适的生活环境。住宅屋顶装有太阳能光伏板，柜子里的电池可以存储暂时不用的电能。偶尔，你想要把屋内的温度调高，一个小型热泵就能满足你的需求。你的住宅有着卓越的隔热性能，所以这一过程不会消耗太多的能源。你无须专门为这些服务花钱，因为生活后盾公司会帮你打理好一切，你要做的仅仅是把能源账单上省下来的钱付给这家公司而已。你不需要车，智能管家知道你什么时候出行，它会提前帮你规划好最佳的交通方案。它可能会告诉你下一班城市公交抵达的时间，可能会提醒你准备穿上骑行夹克，还可能会预约一辆自动驾驶电动车直接开到你的家门口。当你与这家公司签订合同时，你也授予了他们代表你做出某些决策的权力。比如，当自家太阳能光伏板产生的电能储备不足时，公司会替你选择性价比最高的另一家供电商，公司也会管理住宅内的用电需求，以减轻电网在高峰时段的负担。你在能源市场十分活跃，尽管一切操作你都无须亲力亲为。

换一个场景，想象一下，未来的你是个能源贸易商。从单一供应商处获取能源的方式彻底成为历史，欢迎来到点对点能源交易的时代！无须中间商，你可以与能源的生产者或消费者直接交易。这究竟是怎么做到的呢？首先，你自己的住宅就可以充当发电站，你的屋顶装有太阳能光伏板，或许花园里还有一台风力涡轮机，收集的电能存储在屋内的电池中。其次，分布式记账系统会由区块链或者其他相似技术实现，你可以安全地在点对点交易市场上买卖包括电能在内的各种能源。你可以任意地选择交易对象以及交易策略，比如低价购入高价售出，从而最大化收益，或者尽可能只购买清洁能源，从而为环保出一份力。这些操作你既可以亲自参与，也可以全权委托给第三方，让他们根据你的目标定制最优策略。此外，你为独立化的住宅安装了能够管控能源需求的智能设备，在电池的配合下，该设备能够根据你的交易策略调整你的能源需求。不仅如此，它还可以帮助你确定各项需求的优先顺序，比如先给汽车充电还是先为屋内供暖。你可以随心所欲地决定自己在能源市场中的活跃程度——活跃程度越高，回报也就越丰厚。

再换一个场景，想象未来的你毅然决然地中断了与电网的连接，完全掌控了你自己需要的能源。为了实现自给自足，你必须考虑供电、供暖以及出行这三个方面的问题。你将家庭能源的使用效率提升到了极致，从而最大限度降低了对能源的需求。你把所有家用电器换成了直流电设备，让它们可以直接使用太阳能光伏板产生的电能。你购买了燃料电池系统，它可以将生活废物（包括污水）转化为额外的电能和热能。通信、互联和娱乐你依然可以畅享，移动网络加上手持设备能够满足你的一切要求。进行户外活动时，你也在时刻不停地从环境中采集能量，这要归功于你衣服上的小型太阳能电池以及鞋垫中的动能转换设备。这意味着你可以随时给身边的设备充电，使其永不断电。你也会时不时地

面临能源短缺的窘境，不过你很快就能习惯，再说也可以问问邻居愿不愿意伸出援手……

人们可能会聚集在一起，形成所谓的利益共同体或地方团体（或者两者的融合组织），商讨并决断与能源相关的某些问题。同一个利益共同体中的人可以通力合作，争取更优惠的能源供应方案（集体转换），也可以为全新的能源项目众筹。地方团体以其所在的村庄或城镇为基础，加入团体的居民可以参与购买并运营当地的能源基础设施（比如太阳能光伏板），然后共享由此获得的能量和收益。有时，这些团体还会把包括电网和热网在内的地方能源系统整个买下。

但是，全世界此时此刻还有1/6的人住在没有电网覆盖的地方，他们的未来又会怎样？你是否想过，固定电话并不是移动电话出现的必要条件，我们也可以跳过现有的国家级电网建设，直接搭建更先进的设备？借助名为微电网的技术，这个大胆的想法正在逐步走向现实。所谓微电网，是指将一个社区内的太阳能光伏设备（或其他发电设备）、电池、控制系统通过电线连接成的小型发配电系统。换言之，只要提供上述组件，即使与国家电网完全脱离，该社区也能享受必要的能源服务。微电网可以在夜间提供照明，允许社区居民为手机等设备充电。通过提供此类基本服务，这项技术将产生巨大的社会效益与经济效益。事实上，随着太阳能技术与电池技术的进步及其成本的降低，国家级电网已经不再是必需品，我们完全可以将微电网作为替代品，大力推进它的建设。如果能更进一步将微电网与移动通信网和移动互联网结合，那么某些地区就可以一举拿下其他国家花费几十年时间才获得的成果。此外，无现金支付技术也值得一提。顾名思义，该技术可以让居民告别现金，通过手机和指纹等生物识别信息购买商品和服务甚至取得商业贷款，因此，这项技术有望创造新的经济机会。总而言之，这一系列的科技进步意味着，尚未建设国家级电网的国家或许可以跳过这一阶段，直接把目光投向微电网和无现金支付这样的新兴技术。

全球视野

现在，让我们离开个人层次与社区层次，尝试从洲际甚至全球的角度思考能源问题。当然，能源早就已经实现了全球化，各国之间互通的资源数量十分庞大。但是电能也可以这样全球化吗？

事实上，我们已经通过多种方式开展了这项工作。例如，大多数欧洲国家之间都有电缆与天然气管道，即使是四面环海的英国也通过海底线路与法国、荷兰和爱尔兰相连。但是，我们能够实现更大规模的电能传输吗？

DESERTEC是一个试图充分利用太阳能的超级电网计划。其想法是在撒哈拉沙漠及其周边地区建造大量风力发电站、太阳能光伏发电站，以及集中式太阳能热发电站，然后经由西班牙和意大利的新型高压直流

输电网将收集到的电能输送至全欧洲。其中，集中式太阳能热发电技术是该计划的重点，值得在这里简单介绍一下。请想象：我们以发电站为中心部署了许多反射镜，调整镜面的角度使其反射的太阳光汇聚于发电站顶部的接收器。这个技术的原理有点像用放大镜聚焦太阳光，但是在这里，最终汇聚的太阳光能够产生1000℃的高温，然后我们就可以像传统的火力发电厂一样利用高温驱动汽轮机。另外，我们还准备了巨型熔盐罐，将白天多余的热能存储下来，在夜间继续发电。

科学家还设想将太阳能电池板送入太空，然后让它们把收集到的能量发射回地球。虽然这听起来有点像007电影的情节，但这种在20世纪70年代提出的空间太阳能发电设想背后有严谨的科学逻辑。太阳光在穿越地球大气层的过程中会损失大约60%的能量，所以将太阳能电池板安置在大气层外可以大幅增加其收集到的太阳能。不过，即使成功地将太阳能电池板送入了太空，我们也要面临下一个挑战：如何将能量带回地球。使用微波或者激光可能是目前最好的选择。为此，我们需要在太阳能电池板上安装发射天线，用于将波束定向发射回地球，同时地面需要有配套的接收天线（长度也许会达到好几千米），用于将接收到的波束转换成电能。最后，在上述技术难题之外，还存在一些政治层面和经济层面的“小问题”，比如，人们需要通过谈判确定谁能拥有这些能量，谁又要为这些能量埋单……

小结

这趟未来能源世界之旅已临近终点，你现在有何感想？虽然我基本上可以肯定，这些预测不可能每个细节都对，但我希望你能体会到这一点——未来，我们与能源的关系确实会发生转变。

最后，我想留给你一个思想实验。

请暂且搁置你的怀疑，思考下面这两个问题。假如能源完全免费会怎么样？假如你可以摆脱电线，直接以Wi-Fi那样的无线形式获取能量会怎么样？这些听起来像是痴人说梦，但事实上这并非绝无可能。超低成本可再生能源技术（比如空间太阳能发电站）的突破或者可控核聚变（太阳产生能量的途径）的实现都有可能让未来能源的价格变得十分便宜，甚至接近免费。无线电能传输技术也比你想象中的更常见，一部分手机和电动牙刷已经实现了感应式充电，所以类似的技术或许真的能在未来普及。此外，借助能够接收并发射波束的太空中继卫星，远距离电能传输也同样可以实现。但是，问题的关键并不在于技术或经济上的可行性，而在于我们与能源之间的关系会如何变化。如果有朝一日，能源真的如我们呼吸的空气一般完全免费，人类与能源之间的关系会有怎样的变化呢？

未来交通

TRANSPORT

文/约翰·迈尔斯（John Miles）

前面的文章已经介绍了人口问题、基因工程、超人类主义和人工智能。和这些充满挑战的主题相比，本文介绍的交通似乎和这本探讨人类未来的书格格不入。毕竟，交通指的不就是巴士、火车，以及总是挤得水泄不通的机场这些所有人都司空见惯的东西吗？别忙着下结论，其实交通的进步在人类历史的进程中发挥着举足轻重的作用，深刻影响着我们的生活方式。而现在，我们或许只需要发挥一点想象力就能预见未来交通会如何重塑我们的生活方式，带给我们新的惊喜。

人类的基本需求有哪些？获得普遍支持的有这么几项：水、食物、住所、对环境风险的防护，还有爱。很遗憾，这张不长的需求清单上并没有出现交通。但在现代文明的发展过程中，交通却是不可或缺的助推剂，如果没有交通的进步，许多关键的历史进步或许永远无法实现。以车轮这项平凡但意义深远的发明为例，不管是马车、驴车，还是一切现代化的机动交通设备，没有车轮都将彻底化为泡影。公路、运河、铁道，以及飞机的重要性也不遑多让，在这些概念提出之前，或许没人能预料到我们社会的发展将会呈现出今日的面貌。因此，要想窥见交通领域的下一步重大飞跃，我们有必要先了解现有交通工具对我们生活方式的深远影响。

成本、时间、载量与便利性

交通领域的发展会以不同的形式呈现，回顾这些新技术的时候，我们会发现它们有的至今仍令人心潮澎湃（例如协和式飞机和阿波罗登月计划），有的似乎平凡无奇（例如运河船和福特最负盛名的Model-T车型）。这些例子告诉我们，交通新技术的普及性和影响力并不取决于它融合的工艺有多复杂精巧，而取决于它能否满足一些基本的要求。

我们现在就来看看三个重要的基本属性——任何交通系统想要成功都必须在这三者之间取得良好的平衡。首先是价格可负担性（成本），合理的价格是一款产品从竞争激烈的市场中脱颖而出、为广大群众所接受的关键。因此，对于成功的交通系统而言，价格可负担性是应该满足的最显而易见的要求。另外两个属性分别是行程时间（速度）以及传输效率（载量）。

回顾人类历史，我们会发现，对交通领域的创新发展起到最大推动

作用的是战争。在军事领域，成本在速度和载量的巨大优势面前只是细枝末节，所以罗马人会不计成本地修建公路，只为了能在基地之间快速地运输大量军队与装备。而在此过程中，罗马帝国实际上也在其下属的各城镇之间建立了贸易通路，为后续的经济发展奠定了基础。海运发展史大致相似。在这两个例子中，发展交通系统最初都是出自军事上的考量，但它们随后都为人员与货物的流通提供了巨大的便利（后者更加重要）。这些交通系统推动贸易在越来越大的范围内持续增长，进而促进了各个层级——从区域级到国家级再到国际级——的经济发展。我们今天可以清楚地看到，历史上许多国家、帝国或者贸易联盟的建立与其陆上和海上交通系统的发展存在着密不可分的联系。我必须指出的一点是，交通系统未必能自然而然地从军事需求转变成经济助推剂，军事领域的耀眼明星或许只能成为随后社会经济发展的看客。超声速客机的历史就是这句话的一个绝佳注脚，协和式飞机直至退役也未能像它的设计者所期望的那样，成为大多数旅客的首选。这是为什么呢？

依我所见，问题的关键在于，协和式飞机的三个基本属性总体上不符合市场的要求。它的速度确实很快，但这并不足以抵消高昂的成本和过低的传输效率（每次航班最多只能搭载128名乘客）。空中交通领域的最终胜者是大型喷气式飞机，尽管速度较慢，但它降低了每名乘客的花费，增加了每次航班的客运量，从而提升了整体的效率。

喷气式飞机在远程交通方面十分高效，但它运输货物的效率却不尽如人意。因此，海运更适合作为全球范围内的货运方式。海运在成本（以每吨货物运输1千米的费用衡量）和载量（以每天或每年运输货物的吨数衡量）这两点上表现极佳，但耗时极长。在飞机发明之前，远洋船舶作为洲际旅行的唯一方式取得了相对短暂的成功，但海上航行的时间过长，所以几乎所有的海上旅程都是单向的。即便如此，海上交通的发展依然为15—17世纪欧洲人向外扩张提供了必备条件，他们远渡重洋，先后在美国、加拿大、南非以及澳大利亚等地建立了殖民地。可以说，当代世界格局的形成与海上交通在那段历史中的繁荣不无关系。然而，无法全面实现双向旅程的海运在载客领域的主导地位最终还是被飞机所取代。不过，对于不易变质因而对行程时间不敏感的货品而言，海运仍然是上佳的选择。伴随着集装箱技术的成熟，以及船舶吨位的不断增加，洲际货运量的纪录持续被刷新，海运俨然已成为全球化经济的重要支柱。

以成本、时间和载量为标准，我们可以很方便地评判交通领域过去的发展，但这种评判方式的有效性难以延续到未来。过去，我们可能会乘坐列车上下班，因为这样比自己开车更快，而且还可以利用车上的时间完成一部分工作，但未来我们的想法或许会改变。想想看，如果你的汽车有了自动驾驶功能，解放双手的你可以使用智能手机和移动网络进行车上办公，那么你还会继续选择乘坐列车吗？我相信，移动通信、车载计算以及自主控制系统的协作有望延续当前的数字革命，在未来让交通领域改头换面，并且颠覆我们对交通的固有认知。在未来，选择出行方式时我们可能不再看重时间，它的地位或许会被便利性这一新的属性

所取代。

那么，与我们和我们的下一代息息相关的未来交通会具备哪些特征呢？

环境影响

在交通领域，英国目前的人均每公里二氧化碳排放量大约是100克。如何让这个数字大幅减少是政府未来制定各项政策时需要考虑的重中之重。许多国家已经制定了相关法律，明确提出要在2050年前将全国碳排放量减少到1990年的20%。鉴于部分种类的能源消耗（例如空运）可能永远无法达到这一目标，公路交通不得不承担更多的责任。那么，我们是否有能力在2050年前将公路交通的碳排放量减少到1990年的10%呢？我们能否更进一步，实现公路交通的二氧化碳零排放呢？

多数评论家认为，长远来看，内燃机必将消亡，机遇之门已经为敢想敢为的创业家开启。特斯拉公司就是一个成功的例子。这家公司由一个白手起家的团队于2003年在硅谷创立。团队成员中有企业家，也有工程师。他们准确预见到了未来对清洁且性能卓越的汽车的强烈需求。经历了初期的举步维艰，公司随着其标志性人物埃隆·马斯克（Elon Musk）的到来逐步走上正轨。特斯拉生产的纯电动系列车型受到了全世界的欢迎，目前年销售量达10万辆。就在我撰写本文前不久，特斯拉的股价已经超越了福特公司，这样的事情几年之前恐怕还无人敢想。特斯拉是这个行业里的搅局者，它是一家拒绝遵守行业既定规则的、新兴的、年轻的汽车公司，我们亲眼见证了它的崛起，这令人兴奋。70年来，历史悠久的汽车公司只能通过不断合并扩大规模，单打独斗走向成功的仅此一例。无论怎样雄心勃勃，试图在汽车行业分得一杯羹的新企业总是难以拿出足够的资产逾越行业的准入壁垒。但所谓的“科技公司”却可以突破这一限制，它们可以发行股份，从而在硅谷募集大量资源。特斯拉的崛起如同一石激起千层浪，汽车行业的巨变或许真的不再是幻想。无论以特斯拉为代表的搅局者在与传统汽车业的对决中走向什么样的结局，它们对于行业的影响都已产生，并且势必会持续很长一段时间。在过去的几年里，家喻户晓的汽车巨头纷纷宣布将打造纯电动系列车型，毫无疑问，它们会在不久的将来兑现这一承诺。

目前，电动汽车在载量和便利性上的表现与传统化石燃料汽车相差无几，却有着更高的使用成本——至少暂时如此。因此，即便电池价格下降，顾客逐渐把现在使用的化石燃料汽车更换成电动汽车，电动汽车大大改变当前社会经济格局的可能性依然微乎其微。但是，搅局者的出现或许会在其他方面对社会经济格局产生更大的影响，本文会在后面探讨这个话题。

公共交通与智能出行

数字革命拓宽了人们对公共交通的认识，“智能出行”的概念应运而生，被交通领域的专业人士广泛接受。根据“智能出行”的理念，只能从公交车、列车、私家车中选择一种作为出行工具的年代终将成为历史。未来，我们会习惯在一趟旅途中切换多种不同的交通工具。交通规划者一直追求的“多式联运出行”终于有望实现。实现这一目标的努力在过去屡屡受挫，雨天在公交站等半个小时，被迫中途走几百米去最近的地铁站，这些实在让普通人难以接受。为此，全球无数上班族把公共交通的优先级排到了最低——坚决不予采纳，除非别无选择。虽然有车位难找、容易堵在半路等诸多不便之处，汽车对于有经济实力的家庭仍然是首选。

在智能出行构筑的新世界中，公共交通焕发出了新的光彩。如果能建立出行者信息系统，以及囊括列车、巴士、自行车的按需随选公共交通系统，并实现两者的实时信息交互，那么我们就可以在没有任何延误和不确定因素的条件下完成交通工具的行程内切换。或许真的有一天，公共交通可以提供快速可靠的“门到门”服务，我们再也不用为堵在半路或是找不到车位而心急如焚。

自动驾驶汽车

自动驾驶技术是汽车行业的另一个搅局者，它的加速发展强有力地冲击着既定秩序，谷歌、苹果和优步对该项技术表现出的重视令一众车企巨头备感压力。不过，我还是要表达与之前相同的看法，发展自动驾驶技术的公司最终能否取代老牌车企的地位，这并不是我们要关心的事。无论如何，它们已经为行业的发展提供了新的方向，这足以使它们青史留名。我们还不知道谁能成为这场自动驾驶竞赛的胜者，从而赢得至高的学术荣誉，但至少竞赛已经开始，老牌巨头与新兴车企都铆足了干劲飞速发展，这点才是真正重要的。

很多业内人士都认为自动驾驶技术能改变游戏规则，原因大致有两个。第一，该技术能够解决城市的交通拥堵问题。从纽约到孟买，严重的交通拥堵是世界上许多发达地区和发展中地区所面临的共性问题，如何利用有限的公共资源提升公路和铁路的运载能力是摆在政策制定者面前的一道难题。修建新的基础设施既昂贵又不便，从规划到实施动辄就要花费二三十年。另一方面，研究人员经过简单的计算即可证明，自动驾驶技术能够严格控制车道，缩短车间距离，减少驾驶员注意力不集中导致的小型交通事故，可以在很大程度上改善交通拥堵的问题。自动驾驶技术与共享汽车理念的结合会增强民众的出行意愿，但这对于缓解交通拥堵所起到的作用依然十分可观。交通拥堵缓解了，城市运载能力也会有所提升，推广自动驾驶技术所需的资本支出极少，而且这项推广几乎不会造成任何不便，我们有什么理由不去大力发展这项技术呢？

关注交通领域新动向的专家重视自动驾驶的另一个原因是，“时间奉还”有着诱人的前景。一旦车辆实现了自动驾驶，（原先的）驾驶员就可

以自由地安排行程时间。驾驶员可以做些别的工作，也可以自娱自乐，甚至可以打盹儿，这有助于化解漫长旅途引起的不快。只要在车上做的事有价值，即便行程比预期滞后，你也不会感到焦虑。而且，信息系统能够提前通知延迟，并保持信息的实时更新，这会让你更加安心。

那么，上述这些交通领域的明日之星真的能在未来的某些应用场景中生根发芽吗？对于这个问题，诚实回答是：我也不知道。但是透过迷雾，我们确实能看到未来的几种可能，接下来，我会根据现有的认知进行几点猜测。

第一，无论是在城镇还是在郊区，汽车在短程出行中的重要性都将减小（但不会完全消失）。之所以会出现这一趋势，主要原因在于，随着服务水平的飞速提升，公共交通会逐渐成为成熟的智能出行方案。公共交通的便利性会在未来显著提升，载量也将随着需求的上升而增长，这会直接让每名乘客需要分摊的费用大幅下降——正如大型喷气式飞机的出现使机票价格下降。当然，决定公共交通能否成功的关键在于，它和私家车相比优势有多大。与其用法律法规限制普通人选择交通工具，不如提高公共交通的服务水平，吸引更多乘客。这无疑是推动公共交通发展的更有效的方法。提升公共交通吸引力的关键在于确保其多式联运模式的可靠性与无缝衔接。时不时需要变更交通工具确实会带来些许不便，但多数人可以坦然接受换乘，只要交通拥堵和停车困难引起的烦恼能够消除。

第二，在中程（5～300千米）出行中，汽车的主导地位会进一步得到巩固。这是自动驾驶技术进入市场产生的结果，我们将看到城市运载能力显著提升，道路交通事故大幅减少。这两大目标的实现几乎不会给公共资产带来额外的负担。自动驾驶或许还谈不上引发社会经济变革，但它至少能够缓解我们目前面临的困境，这足以使它成为交通领域的一项突破。

我的第三点猜测关乎时下备受瞩目的近声速陆地交通工具：超级高铁。这种交通工具的概念在2013年由马斯克提出，颇受媒体关注。所谓的超级高铁，实质上就是基于磁悬浮技术在真空管道中穿行的超高速列车。想象一下，如果超级高铁的班次，以及乘坐超级高铁去国外城市所需花费的时间，两者都与现在的城市地铁水平相当，那么未来的社会经济格局无疑会发生巨大的变化。有了超级高铁，原本只够从伦敦到曼彻斯特的时间可以让我们从伦敦到达比利时的布鲁塞尔。马斯克也说过，高铁可以让旧金山到洛杉矶的行程时间缩短至45分钟。伦敦地铁和巴黎地铁可以让这两座城市在经济层面成为内部协调的整体，超级高铁也能协调一国的经济。它可以解决英国南北距离遥远而带来的一系列问题，将由此产生的收益分配至全国各地。其他的中小型国家也可以获得类似的益处。但考虑到协和式客机这一失败的先例，超级高铁要想取得成功，除了要兑现超高速的承诺，还必须尽可能地降低成本，提高乘客运输效率，否则它最终只会成为小部分富人的专供产品。这样的模式无法改变当前的社会经济格局。

除了上述内容，我尚未看到交通领域还有哪项技术发展能使我们的生活方式发生革命性的改变。毫无疑问，低排放（甚至零排放）汽车会出现，但它们并不会改变我们的生活方式。海运技术也会有所发展，但无论在成本和载量这两点上如何优化，其行程时间上的劣势终究还是难以忽视。只要我们还能选择飞机，海上交通就无法成为客运领域的主流。空运的情况则恰恰相反。制造商会不断提升传统飞机的性能。然而，在不增加乘客花费的前提下，飞机在载量和班次上如果没有显著的提升，我们的生活方式就不会受到持续的影响。空运能否在货运领域实现飞跃，则取决于未来飞机的运载能力能否达到与大型集装箱船同样的量级，这希望十分渺茫。

交通领域的最后一个前沿课题自然是太空运输。既然你已经熟悉了基于成本、载量、便利性的评价方法，不妨自己思考这个问题，看看这三个属性在太空运输领域的情况。不过，无论如何，太空运输都是一个能够对我们未来的生活方式产生持续影响的新领域。

机器人技术

ROBOTICS

文/诺埃尔·夏基

我们与机器人的未来存在许多种可能。机器人技术的发展可能会让人类大大受益，也可能导致乌托邦的到来。我们无法猜测未来具体会发生什么，这要交给占卜师和科幻小说家。不过，即使不去理会那些稀奇古怪的想象，机器人技术现在也确实吸引着各国政府的目光，各方对这项技术可能带来的数十亿美元的经济增长虎视眈眈。但是，在机器人商业化的潘多拉魔盒尚未打开之前，我们有必要先处理一些紧急的问题。

事实上，我们近几年一直徘徊在机器人革命的风口浪尖。从20世纪50年代起，机器人一直在工厂以远胜人类的速度做着汽车喷漆、组装部件等单调重复的工作。但现在，更年轻的服务机器人在数量上已经远远超过了工业机器人。服务机器人的应用范围涵盖你能想到的所有领域：从医疗保健到老幼看护，从烧饭做菜到鸡尾酒调制，从家庭清洁到农业种植，从辅助外科手术到保护濒危物种，从维护治安、上阵杀敌到监测、修复气候变化造成的破坏，甚至还出现了有争议的伴侣机器人。可以说，只有你想不到的，没有机器人做不到的。

开拓这些应用领域令许多从业者和投资人兴奋不已。机器人产业巨大的国际市场方兴未艾，吸引着各国政府与企业的关注，各方将机器人技术视为增加自身财政收入的关键技术。大量资本涌入，为机器人行业的发展起到了推波助澜的作用。企业与创业者开发了大量的机器人应用程序，行业竞争变得异常激烈，而这一情况必将进一步推动机器人领域的创新。

这个行业未来的发展趋势很大程度上取决于国际监管的力度，以及相关企业和员工愿意承担的社会责任。许多机器人应用的发展是以消费者的信任为前提的，若无法赢取信任，这些应用就会停滞不前，投资人也将面临巨大的损失。

自动驾驶

2005年10月8日，一辆无人驾驶的大众途锐汽车在内华达州的莫哈维沙漠创造了历史，并且赢得了200万美元的奖金。在美国国防高级研究计划局（DARPA）主办的无人驾驶沙漠公路挑战赛中，这辆名为“斯坦利”的赛车以6小时53分8秒的成绩行驶了约212千米的全部赛程，一举夺魁。最终，23辆参赛汽车中有5辆成功到达终点线，第四名与冠军斯

坦利的差距只有36分钟。

这是机器人领域的一个重大飞跃。要知道，在前一年举办的DARPA挑战赛中，15辆参赛汽车中，行驶距离最长的也只开了约11千米，与终点相差约201千米。2005年的赛事结束后，谷歌公司迅速招揽了获胜团队，并在随后的十几年取得了自动驾驶领域一系列引起全球瞩目的成果。

现在，有越来越多的企业试图进入这个竞争日趋激烈的新兴市场。自动驾驶技术的应用范围也在不断扩大，自动驾驶卡车每天从澳大利亚北部的矿山搬运矿产，自动驾驶拖拉机让粮食生产更加高效，自动驾驶公交车已经在美国、丹麦和日本进行性能测试，优步也在美国推出了自动驾驶出租车的服务。当然，在可预见的未来，所有这些自动驾驶设备都需要配备乘务人员，以便在必要的时候进行人为干预。

人们对自动驾驶的热情主要基于这样一个信念：这项技术将大大减少交通事故死亡人数。支持者认为，和人类驾驶员相比，自动驾驶汽车可以凭借各种传感器更快、更可靠地发现并避开行人和其他车辆。另外，自动驾驶系统不会像人类那样疲劳或醉酒，也不会因后排儿童的吵闹而分心。

不过，并不是所有人都看好自动驾驶的发展前景。内华达州更改州法，允许自动驾驶汽车上路后，该州的高速公路巡警特鲁珀·查克·艾伦（Trooper Chuck Allen）表达了担忧：“把路线和车速的决定权交给机械，意味着把其他人的安全也交给了机械，这确实很难让人放心。”虽然自动驾驶汽车极少出现意外，但确实也发生过几起严重的事故，甚至导致了死亡。乘务人员必须保持警惕和专注，在发生意外时及时接管汽车。比如，出现临时交通指示牌或者有交警提醒前方发生事故需要减速慢行时，自动驾驶系统可能无法准确应对，必须进行人为干预。但是，连续盯了几小时却完全没发现有必要插手，乘务人员很可能会对汽车心生依赖，从而逐渐放松警惕，导致意外真正降临之时手忙脚乱。

此外，还有伦理方面的问题。想象一下，面临如下两难之境时，自动驾驶汽车该如何抉择：刹车失灵，只有两条路可走，这时车子究竟该撞向骑自行车的老爷爷，还是该撞向另一辆载有一名孕妇和两个孩子的汽车？这种情况下，自动驾驶汽车能否急速转弯撞向围墙，置车主的生死于不顾？这些问题很有深意，不过就目前自动驾驶汽车的传感能力而言，思考这些还是杞人之忧。除了确保测得的速度、距离等数据的精度，我们还希望汽车能够根据摄像机拍摄的画面“分析”路面状况，判断路面是否有水或油。换言之，我们希望未来的自动驾驶汽车有能力提取深藏于原始传感数据背后的信息。

解决这些难题还需要一段时间，但我们可以预期，到2050年时，全世界的高速公路将发生翻天覆地的变化。当人为干预彻底消除，汽车与汽车，汽车与道路之间通过传感器建立了通信，当汽车能够获悉前方道

路发生的意外，并根据整体情况自动做出响应，交通事故的数量将会大幅减少。当然，这项技术还存在着一个重大缺陷：黑客也许会入侵系统，造成巨大的破坏。

家用机器人

家用机器人是比较无趣的一种机器人，但它们确实已经成为许多家庭的一员。现在的家用机器人并没有做成人形，它们和《星球大战》中的经典角色C-3PO在外表上完全不同。它们更像装有轮子的笨重飞盘，兢兢业业地从事着擦窗、扫地、拖地，以及清理排水槽和下水道这类没人愿意做的无聊工作。

根据国际机器人联合会（International Federation of Robotics，IFR）的数据，2014年全球总计售出470万台机器人供个人或家庭使用。2015年，这一数字增至540万，销售额达22亿美元。而这个庞大的全球市场短期内没有萎缩的迹象，甚至很可能继续扩张。IFR预测2016—2019年家用机器人的销售量将达到4200万台，这还是保守估计。

在未来，越来越多的家务将由机器人完成。除了打扫和清洗，家用机器人还会有更多功能，比如熨烫衣物、折叠毛巾，甚至独立完成用洗衣机洗衣服的全套操作。具备这些功能的机器人不会很快问世，不过我们可以期待，在二三十年内，我们的家中就会出现它们辛勤工作的身影。

还有一些机器人专门用于制作汉堡、比萨、寿司，这类机器人的研发工作也取得了重大进展。当然，能够快速调制鸡尾酒的机器人也已经不是新鲜事物了。不难想象，未来20年里，这类机器人的价格会迅速下降，直至能被普通家庭所接受。

我之所以说家用机器人无趣，是因为它们的设计初衷就是承担我们日常生活中那些乏味、重复、无趣的工作。但这项成果对于我们人类而言其实十分有趣，只要将家用机器人接入物联网住宅，我们就能彻底摆脱烦琐家务的束缚。不过，这里还有一个大问题——

除非你住在宫殿里，否则你的家中恐怕没有足够大的空间安置这么多功能各异的机器人。因此，要想使前面的畅想全部成为现实，我们就需要多功能机器人技术的突破性成果。可惜目前为止，我们还看不到多功能机器人问世的迹象。不过无论如何，未来的智能家居很可能把机器人嵌入各种家用电器之中，或者整合进住宅的基础构造之中。所以，未来的炊具也许会在检测到你离开厨房20分钟后自动关火，从而防止意外的发生。

看护机器人

能够在看护老人和儿童的过程中发挥辅助作用的机器人在过去十年里数量飞速上升。根据IFR的数据，2014年，辅助看护老年人和残疾人的机器人数量比上一年增长了5倍。在这个领域，如果选择对方向，我们会大有收获，反之，一旦我们行差踏错，则会面临严重的后果。

值得我们关注的是保姆机器人的开发。许多亚洲厂商一直在努力制造真正的保姆机器人。这种配备有电子游戏功能、智力测验功能、面部和语音识别功能，以及有限会话功能的机器人能够引起学龄前儿童的强烈兴趣。它还可以将图像与声音实时发送给看护者，在一定程度上预防可能发生的危险。这种机器人对忙于工作的父母而言充满吸引力，而且它的价格也在持续下降。有些家长甚至已经开始使用一些较为便宜的产品，例如售价为2000英镑左右的Hello Kitty机器人。

人口老龄化是看护机器人得以迅速发展的重要动力，因为看护机器人可以为解决老年人护理这一社会难题提供助力。这方面日本走在了世界前列，许多具有不同功能的看护机器人已经上市，比如西科姆公司研发了能够自动喂饭的My Spoon机器人，三洋集团研发了能够自动冲洗的电动浴缸机器人，三菱集团研发了能够进行监控和通信，并且提醒人服药的Wakamura机器人，理化学研究所研发了能够听取简单指令搬运行动不便者的RI-MAN机器人。欧洲和美国同样面临人口老龄化问题，现在也在加大这一领域的投入，追赶日本的步伐。

与任何快速兴起的技术一样，机器人技术潜在的风险和伦理问题需要引起重视。但同时我们也必须承认，看护机器人在许多方面都可以发挥重要作用。对于出现痴呆或其他脑衰老症状的老年人，看护机器人可以提高其自理能力，延后其进入医院或特殊养老院的时间。对于有特殊需要的儿童，看护机器人的作用也已经得到了实例验证。

机器人具有交互属性，可以帮助孩子提高对科学和工程的兴趣，也可以推动老年人投入社交互动。不过，看护机器人普遍装备摄像机，这可能会引发另一方面的担忧：这是否会侵犯年幼者与年长者这两个弱势群体的权益？除了确保各年龄人士的身体健康，社会还有责任和义务尽可能保证他们心理健康，不受冒犯。展望未来，我们将看到更多看护机器人协助看护老人与儿童，但在此过程中，我们必须小心翼翼地把护理工作的主导地位留给人类。

武装和治安防护机器人

不难想象，世界各地的军队也会因机器人在武装冲突中可能发挥的作用而对这项技术翘首以盼。有些应用方式比较温和，比如炸弹拆除，从战场上找回受伤士兵，以及远程操控机器人进行空中侦察。

但是，全球也有不少团体在全力研发可以在无人监督的情况下击杀对手的机器人武器。根据美国国防部的说法，自主武器系统发射之后无

须进一步的人为干预，可以自行选择目标并发动攻击。中国、美国、俄罗斯和以色列正在为率先实现坦克、战斗机、潜艇和军舰的自主化及集群化作战而展开竞赛。

这些武器无疑会对当前的国际人道主义法与战争法（比如《日内瓦公约》）形成挑战，对国际安全构成重大威胁。姑且不论战争的各种是是非非，许多人都认为将是否杀死人类的决定权交给机器在道义上是完全错误的。在过去的几年里，我一直奋战在前线，与众多的非政府组织和诺贝尔奖得主组成联盟，共同呼吁联合国制定新的国际条约，禁止机器人武器的研发和使用。我们已经取得了重大进展。

但是，新的国际条约只针对武装冲突，而不会限制机器人在治安防护方面的使用。事实上，机器人协助警方监视、射击、收集情报、拆除炸弹和解救人质的历史已经有十多年了。这一切似乎都很合理。然而，所谓的非致死性武器作为机器人的装备越发普遍，人权主义者也越发不安。南非的沙漠狼公司于2014年推出了臭鼬无人机，这款无人机装备了四支彩弹枪，每支枪可以在1秒内发射80颗胡椒弹。市场对这款无人机的需求不断增大，公司不得不在阿曼和巴西增设工厂，这意味着民用武装无人机正在全球迅速增多。此外，美国北达科他州最近刚通过了1328号法案，允许警察给他们的四轴无人机装备泰瑟电击枪等所谓的非致死性武器。事实上，这种装备在某些情况下可能致人死亡。

美国警方多年来屡次将非武器机器人临时充作武器使用。警方使用机器人杀人的第一起事件于2016年7月在达拉斯发生，对方是一名导致5名警员死亡，7名警员受伤的狙击手。警方的做法似乎无可厚非，法律专家也表示这完全合法，但问题在于，我们或许已经越过了某条红色警戒线。警察需要保护自己，但在此前提下，警方应当尽可能地采取非暴力手段。只有当非暴力手段无效时，警察才有必要转向暴力手段，并根据对象的反抗力度逐步升级暴力水平。这点对于自主机器人而言无疑是一个巨大的挑战。

当前，为了武装冲突而研发的自主机器人武器也许会进入普通人的世界。在面临恐怖主义袭击等“恰当”的情景下，大量的机器人武器或许可以用来“保护”平民，它们可以在大规模识别和跟踪可疑人员时发挥重要作用。由于后续袭击的威胁持续存在，这些机器人将会变得难以从城市撤离。在任何社会中，机器人赋予警方的巨大力量都很容易被滥用，这样的未来绝对不会是我们想要看到的。

偷走就业岗位的机器人

目前，关于人工智能在几十年内造成大规模失业的报道比比皆是。2013年就有学者预测，美国47%的工作岗位会在20年内被计算机取代。2014年，德勤咨询公司根据在英国、瑞士和荷兰等地展开的研究得出了相似的结论。美国、英国和意大利的银行从业者也对这一趋势表达

了深切的担忧。

有解决办法吗？恐怕没有。有人认为机器人应当只在人类不擅长的领域发挥补充作用，这样一来机器人会用于取代或辅助部分职位，但不会使整个行业都消失。但是，随着机器人成本疾速下降，可胜任工种迅速增加，确实有许多人会在未来面临失业问题。

当失业潮来临时，我们要如何应对？有不少人提出了建议。微软创始人比尔·盖茨提议，公司用机器人代替人工时应缴纳一定税款，作为全民基本收入（Universal Basic Income，UBI）资金库的部分来源。UBI的理念由来已久，近年重获关注。这种理念可以有多种不同的实现形式，其中一种是每月给所有人发放一笔等量的基本收入，等人们获得工资收入后，再适当回收一部分。目前，部分地区正在开展UBI试验，但尚未有任何国家正式推行UBI政策。

机器人时代确实可能是乌托邦，让无数人陷入穷困。但我们也有可能迎来真正意义上的理想社会，每个人都有充分的自由做自己想做的事情。未来究竟会如何，或许只有时间才能给出答案。

为气候变化修复问题的机器人

气候变化造成的影响已经开始显现，我们的水和粮食难以支撑地球不断增长的人口。好消息是，对于气候变化造成的部分破坏，机器人可以起到缓解和预防的作用。

潜艇机器人可以下潜到人类难以到达的深海，在海水水柱中寻找有关全球变暖的重要线索。领跑这项前沿研究的是加利福尼亚州莫斯兰丁蒙特利海湾研究所的海洋生物学家，他们使用水下机器人完成当今海洋科学领域最繁重的工作。除此之外，水下机器人还可用于发现并修复遭到破坏的珊瑚礁。

新加坡国家水利局正在使用机器天鹅监测水库中有机物和无机物的含量。新加坡的另一个项目团队则在开发成群的小型机器海龟，用于监测海洋环境，减轻溢油事故造成的影响。另外，包括苏格兰在内，全世界很多地方的团队都在开发珊瑚机器人。这些机器人可以潜入水中，像蜜蜂和蚂蚁一样以集群的方式协同工作。它们依靠特定的程序把珊瑚和其他海洋物体区分开，从而达到识别的目的。遇到被飓风等自然灾害破坏的珊瑚，以及被渔船拖网破坏的珊瑚，这些机器人可以将它们拼接在一起，使其重新生长。

密歇根州立大学研发的机器鱼群正在协助改善北美五大湖的水质。它们携带的传感器能够监测水温和氧浓度，检测污染物，将水质数据通过无线电传给管理员。

苏格兰海洋科学协会多年来一直在使用定制的遥控无人机

（Remotely Piloted Aircraft，RPA）勘察北极最危险、最难到达的地区，以研究冰川融解的原因。这些无人机使用激光测距仪进行测量，使用相机拍摄极地冰川的图像。冰川专家用这些独一无二的数据进行着有关全球变暖的最前沿研究。

化学品泄漏会对人类和生态环境构成重大威胁，在应对这类问题时，机器人可以发挥关键的作用。例如，机器人可以用于检测石油外泄，检查是否有易燃的甲烷气体或有毒化学品从输运管道的裂缝中逸出。机器人也可以用来检测水管泄漏。别小看这个问题，全世界有多达25%的珍贵饮用水以这种方式流失。阿联酋使用无人机检测水管泄漏，这一措施将水资源的浪费减少了10%。

机器人技术可以提高粮食生产的效率，减轻作物生长对周边自然环境的影响。无人机可用于测试作物的成熟度，防止粮食浪费。自主农业机器人可以大幅提高粮食生产的效率，而且可以大大减少油耗。

保护环境和提高粮食产量可能是未来机器人最重要的任务。若能获得足够的资金投入和国际社会的大力支持，机器人或许会成为人类的救世主。

人类与机器人的未来

除本文提到的内容之外，未来几十年里，机器人技术还会对我们生活中的许多领域产生影响，有些甚至会超出我们现有的想象。看过本文，你应该已经明白，准确描绘机器人技术的未来是非常难的。在未来，机器人带给我们的可能是乐观者眼中美妙的理想社会，也可能是悲观者眼中凄惨的乌托邦。各国政府最近才开始把目光投向有争议的机器人问题，欧洲议会也才刚刚投票确定了机器人法的大体框架。但是，不管新的法律法规有什么内容，机器人的未来发展最终都要依靠我们全人类共同的努力与关注。我们既是消费者，也是公民，所以我们要全力确保机器人带给我们的未来是丰饶的，是迷人的，是能让所有人都受益的。

第五部分　遥远的未来

THE FAR FUTURE

星际旅行与太阳系开发/末世图景/空间传送与时间旅行

星际旅行与太阳系开发

INTERSTELLAR TRAVEL AND COLONISING THE SOLAR SYSTEM

文/路易莎·普雷斯顿（Louisa Preston）

早在2000年，人类就开始体验在太空中生活，不过生活区空间不大，只能容纳不到10名宇航员。这片生活区位于国际空间站（International Space Station，ISS），这是一颗运行于地球轨道的、拥有居住舱的大型人造卫星，也是人类向外太空进发的第一个前哨站。截至2017年，人类尚未在地外天体的表面建立太空殖民地，不过别以为这个想法仅仅是科幻小说的素材。人类最终必然会找到银河系中其他适宜生存的星球，这一目标已经铭刻在了人类命运的图景中，追求这个目标是我们必须自觉承担的责任，也是衡量未来人类成功的关键。人类踏足宇宙的最重要目的或许是了解宇宙以及我们在其中所处的位置，但这绝对不会是唯一的目的。全世界不断增长的人口有朝一日将超越地球的承受极限。为了让人类继续生存繁衍，也为了保护与我们共同生活在地球家园上的其他生灵，我们不可避免地要向外太空进发。与此同时，宇宙中充满了有用的材料与能源，可以为我们提供取之不尽、用之不竭的丰富资源。不过，要想实现目标，我们还有许多文化层面和技术层面的困难需要克服。

推进器的选择

越了解宇宙的广袤程度，我们就越能认识到人类面临的困难有多大。我们无力改变太阳系与其他恒星之间的遥远距离，即便是最近的半人马座α星也与我们相距4.3光年（41万亿千米）。人类目前最快的宇宙飞船是旅行者号，速度为18千米每秒，它完成这次航行需要7万多年。所以，用《星际迷航》中斯科特的话来说就是：“我们做不到，舰长——我们没有这个能力！”因此，我们的首要任务就是将理论结合实践，设计并改进我们的推进技术，让我们在探索宇宙的过程中飞得更快、更远。那么，我们要从哪里开始呢？

很长一段时间以来，化学火箭都是我们“忠实可靠”的星际运输方式，它将推进剂燃烧产生的气体从喷管排出，从而获得推力。不过，我们已经最大限度地利用了推进剂化学键中存储的能量，因此很难将化学推进技术进一步改良，使其满足星际航行的需求。当然，化学火箭仍然可以为我们抵达目标行星提供燃料。如何在可接受的时间范围内抵达目标行星是我们亟须解决的难题。目前，我们也在使用电热火箭发动机，它们产生的推力非常小，自20世纪70年代就被用于卫星轨道姿态的精准控制。显然，电热火箭发动机也无法成为我们探索银河系的首选发动

机。未来，为我们穿越外太空提供推力的或许是离子推进器和太阳帆。离子推进器先将携带的惰性工质电离，然后施加电场，使离子加速喷出，从而获得推力。这样产生的推力很小，但在长途任务中，它携带的每千克工质提供的冲量是化学火箭的10倍。采用当前的技术手段，从地球航行至火星需要6～8个月的时间，但如果改用离子推进器，这个时间可以缩短到39天。现在，环绕矮行星谷神星运行的黎明号空间探测器采用的就是离子推进器，在这项推进技术的帮助下，黎明号成为第一例进入首个天体轨道后能够成功脱离并进入另一个天体轨道的航天器。另一项颇具前景的技术是太阳帆。太阳光束照射到太阳帆上会产生光压，从而形成持续的推力。因此，装备了足够大的太阳帆的航天器即使不携带任何燃料，也可以达到令人难以置信的速度。但是，随着航天器逐渐远离太阳系，太阳光的强度不可避免地减弱，可用的推力也会相应减小。因此，为了使航天器在预定航线上顺利前行并在接近目标行星时成功减速，额外的燃料也是必不可少的。

论潜力，还有其他几种能够帮助人类成为星际旅客的推进方式，包括等离子发动机（本质上就是高能离子推进器）、核裂变发动机、连续式或脉冲式核聚变发动机（实际模拟太阳能产生），以及就可行性而言只能位列末席的反物质发动机。反物质是一类特殊的物质，组成它的基本粒子所携带的电荷与正常物质恰好相反。当反物质与正常物质接触时，两者会湮灭并释放出纯粹的能量。这个过程的能量密度超过任何已知的其他过程。如果可以将反物质用作星际旅行的燃料，我们就能获得迄今为止最高效的推进系统。2006年，NASA创新先进概念研究所资助了一个团队，研究反物质动力飞船的可行性。他们的计算结果表明，1/1000克的反物质就能在45天内将一艘飞船送到火星。然而，问题的关键在于，我们如何才能制造足够的反物质燃料。毕竟，直到今天，全世界所有实验室拥有的反物质加到一块，也只能热一杯茶而已。

家外之家

飞船的速度越快、性能越强，我们抵达遥远星系的可能性就越大。我们最终的目标是建造能够承载全体宇航员，以接近光速的速度在太空中穿梭的宇宙飞船，这将带来两个明确的好处。第一个好处显而易见：我们可以缩短旅程所需的时间，在几年之内到达最近的恒星。另外，如果你以99.5%光速的速度旅行，那么根据爱因斯坦的相对论，别人的时间会比你的快10倍，所以在星际旅程中，跨越了100光年的宇航员只会衰老10岁。当然，这也会带来一个问题，那就是，当他们返回地球时，会发现曾经的同龄友人都比他们老了90岁，甚至早已不在人世。这样的飞船需要非常强劲的推进系统以及大量的防护措施，以保护高速状态下的船体和宇航员不与小行星或太空碎片发生碰撞。或者，我们无须不顾一切地追求更快的速度，而是可以采取另一种方案，即接受飞船较慢的航行速度以及较长的旅行时间。假设我们建造了速度慢得多的星际方舟（比如其速度只有光速的0.2%），那么我们仍然可以在10000年内抵达太阳系附近几十颗恒星中的任意一颗，不过这需要飞船上几百代人的共

同努力。

这样的星际方舟被称为世代飞船，数以千计的乘客居住于此，世世代代在船上繁衍生息，直至抵达最终的目的地。飞船必须足够耐用，这样才能在几千年的时间长河中经受住太空环境的严峻考验。飞船还必须完全自给自足，能够为船上的每个居民提供充足的能源、食物、空气和水。飞船内部的系统也必须非常可靠，只要居民进行定期维护，它就可以在漫长的时间内正常工作。飞船上的居民将组建家庭，孩子出生后会接受训练，学习如何操控及维护飞船，并在父母和祖父母衰老或死去之后接手他们的工作。世代飞船上独特的环境无疑会催生许多生物层面、社会层面和道德层面的难题，特别是那些涉及自我价值、组织管理以及人生意义的问题——最初的先驱无法活着看到自己的使命完成，中间的几百代人也注定在船上生、在船上死，有生之年看不到自己的努力有任何实际的成果。被迫和飞船捆绑在一起的他们究竟对此作何感想？他们能够应对这样的环境吗？

为了避免这些问题，我们或许还有一个更好的方法，就是让飞船上的大多数人甚至所有人进入休眠或假死状态。这样一来，他们就可以活着抵达旅途的终点，这种飞船被称为睡船。我们还可以设计携带胚胎的星际飞船（Embryo-Carrying Interstellar Ship，EIS），它可以将处于冷冻或休眠状态的人类胚胎或DNA送至遥远的目标天体。然而这种方法存在一个明显的问题——如何让这些胚胎顺利成长？因此，航行时间不超过人类寿命的飞船仍是最佳选择。理论物理学家弗里曼·戴森（Freeman Dyson）曾经构思过这样的宇宙飞船，它以核聚变或核裂变作为动力来源，通过不断地引爆小型核弹来获得推力。美国政府曾对这一方案开展过研究，这就是所谓的“猎户座计划”，但这项计划最终因其潜在的放射性威胁而被放弃。最后，我们还可以在太阳系部署大功率激光发射器，用激光束来推动飞船。斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking）、尤里·米尔纳（Yuri Milner）和马克·扎克伯格（Mark Zuckerberg）基于上述想法提出了突破摄星计划——制造能够飞抵半人马座α星的光推进小型自主航天器。根据计划，这些名为摄星的航天器将在20年内完成发射前的准备工作。摄星由超薄光帆和贴在光帆上的芯片组成，芯片的尺寸与普通的硅晶片相当。大约上千颗这样的摄星会先搭载一艘母舰进入太空，随后，建造在高海拔地区的激光设备会向它们发射激光，很快这些摄星就能加速到20%光速，向着最终目的地进发。在这个速度下，它们需要在空间中飞行20年才能抵达半人马座α星。

也许，我们不一定要静静等待现有的技术逐步成熟到与我们进军宇宙的野心相称。科幻作品向我们提供了别的方案。根据《超时空接触》和《星际穿越》这类科幻电影，我们“只需”找到一个虫洞就能实现星际旅行。从此，你可以告别漫长的旅途，穿过虫洞通道就能在瞬间抵达银河系的另一头。尽管这听上去很像天方夜谭，但我们无法完全否定它在理论上的可能性。然而，即便真的发现了虫洞，我们目前也没有充分的证据证明这种方法确实可行，对于人类这样的脆弱物种而言，它的安全性恐怕也要打一个大大的问号。

人体的脆弱

除了巨额成本以及必要的科学进步和技术发展，人类的太空探索事业还面临着另一个巨大的挑战，即脆弱的人体是否能适应太空旅行。要想让未来的人类进行长期甚至无限期的太空旅行，我们必须清楚地知道长时间的太空生活会给我们纤细敏感的生理系统带来怎样的影响。此外，我们还需要研发能够在太空环境中保护人体的技术，并对其进行性能测试。目前，在国际空间站生活的宇航员就是我们的实验小白鼠。

宇宙飞船上必须配备人工生命支持系统，它能够提供水、空气和食物，并让太空舱内保持舒适的温度和气压。同时，飞船还需要配备防御设施，以避免危险的太阳辐射、宇宙辐射、小行星和太空碎片对船体和船上的乘客造成伤害。科幻作品描绘了制造人工重力的方式——让具有刚性结构的空间站高速旋转，其产生的离心力就能模拟重力——但这样的构思却未能付诸实践，主要原因在于，这要求航天器具有相当大的尺寸。因此，我们今天仍然无法避免太空中缺少重力的问题，我们必须寻找有效的应对方案。虽然人类的身体可以很好地适应失重环境，但我们在太空中待的时间越久，重力缺失带来的长期影响就越大。在微重力环境中，我们的身体无须耗费能量抵抗地球引力，因此会变得松弛，钙质会从骨骼中渗出，由尿液带出身体，最终导致肌肉萎缩以及骨量流失。随着时间的推移，宇航员的骨骼强度会不断弱化，他们有可能在年纪轻轻时出现类似骨质疏松的症状。在太空中飘来飘去听起来既轻松又有趣，但是终日处于这种状态，宇航员的身体会日渐衰弱。此外，在太空生活一段时间之后，宇航员的脊柱会被拉长——他们基本上都会长高两三厘米。受到体液上涌的影响，他们的脸部会浮肿，同时眼部出现问题。幸运的是，一旦宇航员返回地面，在地球引力的作用下，他们的症状大多能得到恢复。但是，如果未来的宇航员无法选择适时回到地球的重力场——比如，他们需要执行长期航行甚至世代航行的任务，或者他们找到的外星殖民地重力明显低于地球——他们又该怎么办呢？

还有一个问题同样重要：在太空中生活显然会造成个人空间的缺失。宇航员面临的最广为人知的挑战包括长期隔离、生活单调、行动受限、睡眠紊乱、个人卫生条件变差。与同一群人生活在极为狭小的空间内，隐私确实成了一种奢侈。作为目前人类太空探索唯一的前哨站，国际空间站的大小相当于五居室或六居室的住宅，但即便如此，在这里连续待上半年或更长时间仍然会让宇航员感到难以忍受——无论是在精神层面还是身体层面都是如此。因此，我们希望任何执行长期太空任务的宇宙飞船都拥有比国际空间站大得多的空间。在太空生活意味着每天与风险做伴，宇航员可能抑郁、失眠、焦虑，他们可能要面对人际冲突甚至精神错乱。通常，他们都会为这些潜在的威胁做好充分的准备。最后一点关乎太空食品，其口感之糟糕已经不是什么秘密了。预包装的脱水食品寡淡无味，太空冰激凌与地球上的真品大相径庭，调味用的胡椒粉则泡在橄榄油里，以避免在空间站里撒得到处都是。日复一日地吃着同样乏味的食物很容易让宇航员产生饮食疲惫感，这是那些可选食物种类有限的人经常遭遇的苦恼。对食物感到厌倦的宇航员有可能丧失食欲，

卡路里消耗减少，最终出现体重下降以及营养不良的症状。所以，任何长期的太空旅行都需要准备种类丰富的鲜美佳肴供宇航员选择。

地外前哨站

我们已经对未来的太空旅行进行了那么多畅想，不妨停下脚步，看看人类在探索外太空的道路上究竟走了多远。尤里·加加林于1961年首次进入外太空，以此为起点，我们取得了如下成就：将人类送上月球，将探测器派往金星和火星，调查最大的几颗小行星，拍摄木星及其巨大卫星的特写，穿过土星的光环和土卫二的冰冷喷流，拍摄天王星和海王星的细节图像，展示冥王星冰封万里的真正美景，我们甚至让探测器跳到了高速飞行的彗星上。正是有了这些对太阳系的初步探索，我们现在才可以认真考虑建立自给自足的外星殖民地。然而，以人类当前的技术水平，在地球以外的任何地方建立居住区都会使我们面临巨大的挑战——地球以外的环境显然对人类不太友好，为了让几百甚至几千人在这样的环境中生存下来，我们必须想方设法渡过一切难关。

月球

就目前而言，最有可能真正成为外星殖民地的是离我们最近的天体。月球很可能会成为我们的第一个星际港口——这颗天然卫星也许是我们在地球引力范围之外进行材料、设备和人员中转的理想选择，我们也可以在月球上测试人类在外星环境中生存所需的种种技术。建立月球基地之后，我们向火星以及深空进军的能力将得到显著提升，这甚至可能促进太空旅游业的蓬勃发展。然而，在月球上建立居住区并非易事，特别是考虑到月球表面的重力只有地球的1/6。我们还必须留意建筑材料的性能：它们能否应付月球的真空环境？它们的强度能否经受住速度可达10千米每秒的微小陨石的冲击？它们如何响应极端的昼夜温度变化（从120℃到–153℃）？

和其他一切外星殖民地一样，月球基地将成为未来月球居民的命脉。因此，基地必须有稳定的水循环，有压力合适的空气供人呼吸，有适宜的环境令农作物生长，这里还要抵御猛烈的太阳辐射。月球的黑夜很漫长，相当于地球上的两个星期，基地必须确保在这段时间内有充足的光照、温度，以及能源供给。2009年，印度的月船1号探测器在月球北极的永久阴影区发现了40多个陨石坑，据估计，这些陨石坑内含有6亿吨水冰——月球基地可以设法利用这一资源。为了自给自足，基地需要循环利用90%以上的水资源。此外，基地内产生的二氧化碳将用于营造温室效应，也将作为原料供植物进行光合作用，生产氧气，构建气体循环。

火星

尽管月球才是距离我们最近的天体，但在想象中，人们似乎更倾向于将火星视作未来太空探索的前哨站。创办了太空探索技术公司（SpaceX）的知名企业家马斯克近几年来一直致力于研发所谓的行星际传输系统（Interplanetary Transport System，ITS），该系统囊括了太空探索和外星殖民所需的一切重要设施与关键技术，马斯克计划在未来的50～100年内用该系统将100万人送上火星。在过去的40年，我们往火星派遣了多个空间探测机器人。通过它们收集的信息，我们不仅进一步了解了地球的历史，还知道了火星表面有什么在等待着我们。就算撇开火星的知名度，它也确实拥有太阳系中仅次于地球的温和环境，我们甚至可以说火星是宜居的。为了抵达这颗红色的行星，人类仍然要面对重重障碍，比如长达300天的行程时间，遭受辐射的风险，长期处于微重力环境对身体造成的影响，以及极度危险的着陆过程（目前无人航天器安全完整地降落到火星上的概率还不到30%），但是在火星建立前哨基地有着诱人的前景。一旦克服困难，获得成功，我们将获得比月球更好的生存条件。

火星的自转周期和自转轴倾角都与地球相近，季节变化相似。火星拥有水冰、适宜居住的环境以及大气层（尽管很稀薄），不过正是这层大气带来了我们要面对的重大挑战，它95%的成分是二氧化碳，并且气压极小，只有0.006个标准大气压。如果不借助设备，人类不可能在这样的环境中生存。此外，火星的引力只有地球的38%，环境温度很低（–85℃～–5℃），因此其表面不存在液态水。那么，登陆火星之后，我们要住在什么地方呢？除了科幻电影中常见的充气式圆顶帐篷，我们还可以在遍布火星的撞击坑和熔岩管道内打造居住区。实际上，只要利用好这些天然屏障，我们就能集中修建大型建筑，保护居民不受太空环境的伤害，实现长期定居——这是人类在火星建立殖民地唯一切实可行的方式。这些建筑不必一次性完工，我们可以将任务划分成几个阶段，然后分批次完成。以组件形式生产装配的国际空间站为这一方案提供了灵感。居住区修建完成之后，居民要马上实现自给自足，我们要自己种植作物，生产氧气，开采地下水。因此，人类和植物将同时成为初代火星居民。这真是完美的旅行伴侣，我们和植物通过交换氧气和二氧化碳来维持彼此的生命。

金星和冰卫星

我们不能忽略太阳系其他有趣的成员，尽管开发它们还存在明显的障碍。人类自身的生理条件以及如今的技术水平还远不能让我们前往金星定居。人体是很脆弱的，暴露在金星的环境中，一个人10秒钟之内就会死亡——9200千帕的大气压力会把他压扁，465℃的高温会把他烧成灰，而他呼吸的最后一口空气也是有毒的。显然，金星炎热残酷的环境并不适合人类长期居住。然而，我们或许可以利用金星的极端气候条件，在金星浓密大气层的高处建立人类居住区。只要居住区内部的气体组成维持在与地球大气相似的水平，人类就有可能在其中生存，因为距金星表面50千米高处的气压与地球海平面的气压相近，而且这里的温度

正好略高于0℃。如果这样的居住区真的建成了，那么里面的居民只要戴上氧气罩就能外出探险，还能俯瞰脚下的金星云层。

我们对木星和土星这两颗气态巨行星各自的卫星木卫二和土卫六也有兴趣。木卫二的冰冻表面（温度低至–220℃）其实非常适合人类探险家建立基地（我们可以像在南极洲那样生活），但是木星的磁气圈会对木卫二释放致命的辐射，严重威胁居民的生命安全。因此，木卫二基地的最佳选址地点要么是冰壳下方，要么是背对木星的半球，这样才能尽可能减少基地受到的辐射。选择土卫六，我们甚至可以不用穿增压太空服，只需要穿上足够保暖的衣服，再携带一罐氧气即可。土卫六有着浓密的大气层，站在土卫六表面，感觉像浸没在地球上的游泳池中。土卫六的地貌与地球相似，有平坦的区域可供我们安居。令人兴奋的是，土卫六拥有大量包括水冰在内的生命活动所必需的资源，这为我们提供了便利。

小结

从当前的技术水平出发，我们很难预测未来的太空探索会有怎样的中长期发展。在某个时刻，我们不得不区分哪些理论与技术属于科幻和幻想，前途渺茫，而哪些又是科学的、实际的、大有可为的。我们深知，为了克服远距离造成的种种阻碍，我们需要更好的推进技术。设计筛选推进技术方案以执行太空探索任务并实现运输系统的变革，开发部署机器人以调查外太空中潜在的适宜居住地，这些都意味着我们要长期面临人力、物力与财力上的严峻考验。如何选定具体的外星殖民地也需要仔细研究，后续还有选拔居民的问题。在我们的星球上，简单的工程项目在正式动工前也面临着初步调查、现场勘测、环境取样分析等多个步骤，更何况是星际殖民这样的大项目呢？

我们明确知道的一点是，人类的太空探索事业既危险又昂贵。人类的缺点有很多，比如身体脆弱，对环境挑剔，离不开水、氧气和食物，对空间环境的承受能力差，以及不愿意冒生命危险。空间探测器就没有那么多毛病，它们只需要相对少得多的防护和支持就能持续工作数十年甚至更长时间。无疑，我们在太空探索的过程中会更偏爱这些忠诚的探测器，尤其是现在，在研究人员的努力下，它们的性能和自主性正变得越来越出色。探测器传回的信息让我们对月球和火星有了更深入的了解，我们也明确了人类造访外星世界可能面临的重大难题。这些信息还能帮助我们寻找切实可行的解决方案。

人类在太空探索的过程中并非一无是处。我们动作灵活、灵感迸发，拥有天生的聪明才智，这些都能发挥重要作用。至少到目前为止，还没有哪种机器能在好奇心上战胜我们。在太阳系和更遥远的地方，很可能有千百个适合人类居住的外星世界等着我们去探访。最后，我由衷地希望，这种对新世界的探索欲在推动我们向太空进发之余，还能帮助我们认识到如何成功地在地球上长久地生活下去。

末世图景

APOCALYPSE

文/刘易斯·达特内尔（Lewis Dartnell）

一切未存档的内容都将丢失。

——任天堂《超级马里奥银河》“退屏”信息
T. 迈克尔·马丁（T. Michael Martin），《末日游戏》

许多作者都在探讨当我们对宇宙有了深刻的理解或者掌握了有望彻底改变当前生活方式的先进技术之后，未来会发生怎样的变化。但我想在本章探究一些会造成历史的进程偏离原定计划的情景。如果我们想要的未来没有如期而至，那么会发生什么？

为了明白将来可能发生什么，我们可以转过头，从自身的历史中汲取经验教训。早在几千年前，我们的祖先就开始发展农业，然后建立城镇并逐渐壮大，在此期间，有无数的文明最终走向灭亡，消失在了历史长河中。事实上，我们的文明在最近几个世纪里持续发展，同时伴随着技术的持续进步，从历史角度来看这其实颇为异常。那么，有没有什么灾难性的事件可能会引发未来的世界末日呢？更加重要的是，我们现在是否能做些什么来保留住现代知识的种子，好让末日的幸存者能够在尽可能短的时间内重启文明呢？

任何伟大文明的覆灭往往会导致历史的断层，知识会遗失在时间的迷雾中，社会的发展会在一段时间内步履蹒跚。人们最常谈论的例子就是随着西罗马帝国灭亡而开启的“黑暗时代”。但是，这个例子的叙述往往会有些过分简化，并且明显带有欧洲中心主义的倾向，因为在此期间，伊斯兰世界与古代中国仍然持续着学问、技术、社会等领域的发展，而且即便是欧洲自身也并没有像人们普遍以为的那样停滞不前。实际上，欧洲在这段时间里取得了许多重要的进展——比如发明了风车塔、机械钟以及重型犁，其中重型犁的出现为北欧黏质土地区的农业带来了变革。但不可否认，西罗马帝国的消亡确实造成欧洲在中世纪初期的发展受阻，产生了深远的历史影响。此外，在更加久远的青铜时代，地中海东部地区的多个文明也曾遭遇灭顶之灾，其后果就是始于公元前1100年左右的另一个“黑暗时代”的出现。世界范围内还有许多其他从兴盛转向衰亡的文明：印度河流域文明、复活节岛的拉帕努伊文明、美洲大陆的玛雅文明和奥尔梅克文明，等等。认定我们当前的工业文明由于某种原因可以免疫突如其来的崩溃并且可以无限期地持续存在下去，这

无疑是一种狂妄自大的念头。事实上，以约瑟夫·泰恩特（Joseph Tainter）为代表的人类学家认为，随着社会结构与人际关系变得越来越错综复杂，就像我们的文明当前所呈现的那样，当灾难突然爆发时它就会显得愈加脆弱。

全球性灾难的风险

从战争和别国入侵到自然灾害再到过度开采和自然环境恶化，造成文明消亡的原因是多种多样的。现代文明已经覆盖世界的各个角落，我们把可能在不久的将来威胁到现代文明的灾难称为全球性灾难。这样的灾难按可能性从高（比如全球范围的流行病）到低（比如小行星撞击）到几乎为零（比如僵尸暴发）的顺序排列可以得到一份长长的名单。我们接下来就选取五种具有现实可能性的全球性灾难进行深入探讨。

气候变化

气候变化最有可能成为推翻现代文明的凶手。我们知道气候变化已经开始，而且推动这一过程的正是人类自身的行为：我们的工业、农业和运输业每天都会排放大量的二氧化碳（和甲烷）。全球的平均气温会持续增加，海水的受热膨胀以及冰盖的消融会导致海平面上升，海水吸收了空气中过剩的二氧化碳会引起海洋酸化。不仅如此，区域性气候也会发生剧烈变化。全球变暖将引起降水分布的改变，有些地区会发生洪水，另一些地区则会遭遇干旱，两者都会对农业生产构成严峻挑战。如果粮食产量受此影响而无法满足飞速增长的人口的需求，那么这将演变成一个攸关生死的问题。或许很快，可靠的淡水资源就会像原油和其他珍稀的自然资源那样，成为加剧地缘政治紧张局势的重要因素，第一次“水资源大战”的爆发可能就在不久的将来。地球的大气、海洋、陆地以及一切有关的反馈回路共同构成了一个十分复杂的系统，想要基于这样的系统准确预测气候变化的快慢以及局部效应的产生是件极其困难的事。还有一个值得特别关注的问题，目前在大洋底部和永冻层封存了大量的甲烷——这种气体的温室效应大概是二氧化碳的25倍。一旦这些甲烷被释放到大气中，全球就有可能会在短时间之内剧烈升温。气候变化的危险之处在于它的发展可能非常迅速，我们无法跟上其步伐完成基础设施的建设，只能眼睁睁地看着现代文明走向衰亡。

小行星和彗星撞击

大多数小行星不会离开火星和木星之间的小行星带，不过也有些小行星可以运动到距离地球十分近的位置，它们被称为近地小行星。随着太空采矿技术的发展，近地小行星或许能为未来的我们提供珍贵的金属材料，但与此同时，我们也面临着小行星撞击地球的威胁。我们相信，科学家经过长期的巡天观测已经识别出了最具威胁的近地小行星并对它

们的轨迹进行了持续跟踪，他们还初步调研了如何使危险小行星的轨迹发生偏移，使其进入一个相对安全的轨道（需要的技术与太空采矿相似）。然而彗星撞击留给我们的准备时间则要少得多——可能只有几个月。彗星大部分时间都待在太阳系外围的阴暗区域中，但在某个时刻，引力会“推”它一把，让它朝着内太阳系和地球高速冲去。这就意味着，当彗星撞击地球时，它会带有非常大的动能，而且我们无法及时地从望远镜中发现它，因此来不及做些什么阻止这一碰撞过程。大直径的小行星或彗星撞击地球，造成的影响将是毁灭性的。如果落入海洋，它们会掀起海啸，淹没附近的海岸；如果撞击陆地，它们会粉碎岩石，溅起遮天蔽日的尘埃，引起大范围的火灾。许多科学家相信，6500万年前正是由于有一颗直径在10千米左右的小行星撞上了地球，才引发了包括恐龙在内的大量生物的灭绝。同等大小的天体在可预见的未来再次造访地球的可能性并不大，但即使撞击地球的小行星或彗星直径只有1千米，它也会破坏大片的区域，动摇现代社会的根基，引起文明的衰退。

超级火山

在许多方面，超级火山爆发都会造成与小行星撞击类似的影响。如果火山爆发时你碰巧就在附近，那么很明显，你会因为涌出的岩浆、灼热的灰云、滚落的岩石或者有毒的烟雾而死亡。但更值得引起我们广泛关注的是，一座足够大的火山如果爆发会产生怎样的全球影响。火山灰和硫化物进入高空后将覆盖地球，遮蔽阳光，导致持续数年的“火山冬天”，仅仅这一点就有可能摧垮全球农业。长期来看，突然的降温甚至可能让我们进入另一个冰河期。在并不久远的过去发生的一起事件就对我们敲响了警钟：1815年4月，印度尼西亚坦博拉火山爆发，让随后的那一年成为“无夏之年”，北半球的许多地区都因此面临食物短缺的问题。一些科学家认为，71500年前多巴火山的爆发（同样发生在印度尼西亚，该地处于板块俯冲带，火山活动非常活跃）可能让当时全球人类的数量锐减到只有几万人。今天的火山学家们对美国黄石国家公园的超级火山保持着密切关注。它的火山喷口直径达40千米，上次爆发在距今64万年前，形成的火山灰云几乎覆盖了美国密西西比河以西的所有地区。如果——更确切地说，当——黄石超级火山未来再次爆发，我们的文明很可能会遭到破坏，甚至走向衰亡。

日冕物质抛射

小行星或彗星撞击并不是唯一能够引发大灾变的地外威胁。地球上的一切生命可以说都是由太阳所孕育，但与此同时，它也对我们当前的科技文明构成了威胁。与所有恒星一样，太阳经常向外抛射表面大气，呈现巨型泡沫的形状，这一过程名为日冕物质抛射（CME）。这些仿佛太阳打嗝呼出的气泡质量可达十亿吨，在高温下，气泡内的分子处于等离子态（以离子和电子的形式存在），并且其中充斥着磁场。CME有小概率会直接朝向地球，特别剧烈的CME可能引发灾难性的后果。今天的

我们在导航、通信及对地观测等多个领域都要依赖人造卫星，许多地面操作也需要GPS卫星提供的精准授时信号加以协调，比如全球经济下的金融交易。然而，伴随CME出现的粒子辐射很容易破坏太空中的敏感电子器件与太阳能电池板，所以一次强烈的CME爆发就有可能让我们浩浩荡荡的卫星群中的很大一部分彻底瘫痪。不仅如此，CME与地磁场的碰撞或许会对生活造成更加恶劣的影响。当地磁场受到剧烈扰动，配电网的电缆中可能感应出强大的电流，让至关重要的变压器遭受永久破坏。1859年“卡林顿事件”光顾地球，一时间，罗盘指针乱转，电报机的接线火花四射，远离极点的地区也出现了极光。当时的社会其实尚未真正进入电气时代，如果那起事件发生在今天，我们受到的损失会更加惨重，而且长时间的停电也会妨碍我们的修复工作。1989年的太阳风暴曾导致加拿大魁北克省发生大规模停电，而就在不久前的2012年，一次剧烈的CME以毫厘之差与地球擦身而过，如果当时正面迎上，我们的许多现代化设施都将报废。

全球流行病

纵观历史，传染病始终是人类苦难的来源之一，而且时不时地就会出现一种传染性非常强的疾病在大量人群中肆虐蔓延，成为全球流行病。黑死病被认为起源于中亚的大草原，携带病菌的商人经由丝绸之路将这种疾病带到了欧洲，混入商船的老鼠则加快了病菌的传播。1347年，黑死病在中世纪的欧洲大规模暴发。在接下来的几年里，欧洲的人口因这场瘟疫整整缩减了1/3，在受灾最严重的城区，死亡率甚至高达一半。据估计，整个欧亚大陆有1亿到2亿人死于这场瘟疫。若把目光转向近代史，“西班牙流感”是个不得不提的名字。时值第一次世界大战接近尾声，这场流感于1918年3月突然暴发，并在短短六个月的时间里传遍世界，感染了全球1/3人口。该病的致死率极高，最终的死亡人数超过了5000万。如果一种传染性强、致死率高的病毒出现在现代社会，那么它造成的后果可能要更加严重。今天，大多数人口居住在拥挤的城市，这为传染病的迅速蔓延提供了理想的条件，而且定期的长途航班让人们可以方便地在遥远的大陆之间往来，使得检疫与疾病控制更加困难。即使在同一时期内染病死亡的人数只占全球很小的比例，许多关键的公共服务——医疗、警务、水处理、电力生产以及食品生产与销售——还是会受到影响而无法正常运转，社会也将因此而分崩离析。

文明的备份“存档”

像大型小行星撞击和全球核战争这样的灾难破坏性强、波及范围广，灾难结束之后幸存者们很难迅速恢复文明。日冕物质抛射则会摧毁我们的科技基础设施，不过基本上不会造成人员的直接伤亡，然而骤减的资源可能引起人类内部的激烈冲突，从而造成残酷的“二次减员”。如果世界末日无法避免，那么至少从便于幸存者灾后重建的角度而言，最佳的末日来临方式将会是一场突如其来的致命瘟疫。这将迅速减少人

口，但留下所有的物资：幸存者们大可一边学习重建文明所需的知识与技能，一边在废墟中搜寻用得上的工具和材料。

那么，今天的我们要做些什么才能让我们的未来在全球性灾难爆发、文明濒临崩溃的情况下仍然得以延续呢？在世界各地，尤其是美国，有一群被称为“末日经营者”或“生存主义者”的人，他们认为世界末日说不定会在自己的有生之年降临，因此储备了各种必要的消耗品，比如瓶装水、罐头食品、常用药物，以及用于自卫的武器。但不管储备了多少，它们终究会有用完的一天，届时你将不得不在工业化文明已经消失的世界尝试自己生产制造，那么你要从哪里获取所需的一切知识呢？当前文明最为重要的科学知识和技术窍门的积累花费了我们几个世纪的时间。当上帝按下重置按钮，当“一切未存档的内容都将丢失”的消息弹出，我们要怎样才能为后人保留人类知识的核心？我们要怎样才能帮助幸存者避开又一个黑暗时代的来临，让他们能够在从头开始的情况下尽快重建文明呢？

从维基百科到YouTube上的视频指导，今天的我们可以在线获取大量有用的信息，但是它们都要依附互联网才能存在。虽然互联网最初的开发者是想把它设计成不受核攻击影响的可靠军事通信网络，但当末日降临，电网发生故障，服务器连不上电源，互联网也会从这个世界上消失。（不过有人以玩笑的方式在维基百科上拟定了“终极事件管理政策”，阐述了当全球性灾难即将来临时，如何快速地将维基百科的线上内容打印到物理媒介上。）然而，维基百科的内容并不像教科书那样具备循序渐进的逻辑架构，而且也并不包含太多的实用信息。

为了帮助后人在末日后重启文明，理想情况下我们应该编纂某种意义上的“全书”或者说建立一座万卷书库，保留对人类最有用的信息。书不同于DVD和计算机数据库，它存储信息的方式是文字和图像，所以你不需要眼睛以外的任何辅助工具。因提出盖亚假说，将地球视为能够自我调节的完整个体而闻名的詹姆斯·拉夫洛克（James Lovelock）曾于1998年撰文哀叹：“我们的文明没有永不磨灭、无所不在、万一崩溃时能够让幸存者将其复原的记录。”他在文章中还阐述了“四季书”的构想，这种书类似于完备的科学教科书，并且还提供了许多实用信息。《地球目录》的前编辑、《连线》的创始人凯文·凯利（Kevin Kelly）也提出了“永恒之书”或者说“实用图书馆”的概念：在边远地区的某座山山顶建立书库，存储大约10万册的图书，书中囊括重建文明的根基、再现文明的科技所要求的一切基本知识。有一个名为今日永存基金会的组织，关注着人类的长远未来。基金会的其中一个项目建造了一座位于山腰的巨型时钟，它可以为自己供能，在至少一万年的时间里保证显示的时间准确无误。不同于拉夫洛克和凯利还只停留在理论阶段的构想，今日永存基金会已经开始了图书收集，用于建立他们自己的“文明指南”书库（我也为书库的建设出了一份力，贡献了多本书，其中包括了我自己的科普书《世界重启：大灾变后，如何快速再造人类文明》）。

令人惊讶的是，这样的想法并不是在我们这一代才刚刚产生，它的

历史比我们想象的更为悠久。最初的百科全书是知识分子应该记住的所有信息的概略（百科全书的英文“Encyclopaedia”字面意思是“学问圈”，或者说全面教育）。然而到了17世纪，科学研究方法的进步使得知识的数量经历了爆炸式增长。在这种情况下，任何人想要掌握人类所有已知的知识无异于痴心妄想。因此，百科全书的作用就变成了提供现有知识的摘要以供人们参考。但是，18世纪中叶的百科全书编纂者比今天的我们更加敏锐地认识到，即便是最伟大的文明也有其脆弱性，存在于人类头脑中价值连城的科学知识和实用技能有可能湮灭在历史的长河中。

《科学、美术与工艺百科全书》的主编德尼·狄德罗（Denis Diderot）曾经明确表示，这套从1751年开始陆续出版了28卷的百科全书起到的作用是人类知识的安全备份。他为后人保留了文明的精华，以避免文明因灾难而出现断层——就像古埃及、古希腊和古罗马的文化几乎全部失传，只留下少量的断章残篇那样。他想让百科全书成为时间胶囊，在封存人类智慧结晶的同时能够抵御时间的侵蚀。这就是“全书”（至少是书库中的一个书架）理念的最初诞生，也就是试图系统地解释人类已有的知识以及不同主题之间的相互关联。百科全书的编纂者们也非常认真地在书中加入了工艺技法和实用窍门的图表以及重要原理的详细实验证明。这样一来，一套完美的百科全书将会成为地球上全部书籍浓缩而成的精华。信息之间以交叉引用的方式相联系，并且以合乎逻辑的方式加以组织，若世间存在某种无所不知的生灵，他的记忆想必也是大抵如此。个体想要将卷帙浩繁的所有材料全部记住（哪怕是理解）是不切实际的，但至少在原则上，任何人只需这一套书就足以自学一切可能用到的知识。

然而，纸质书虽然方便阅读，但也存在一些问题。纸张容易燃烧，而且受潮之后很快就会腐烂分解。此外，经过加固的末日图书馆需要遍及全球，如此才能为分散在世界各地的幸存者们提供帮助，这将是一项艰巨的任务。但借助现代技术，我们可以将重启文明的种子以更紧凑的形式封装起来。使用Kindle之类的电子阅读器，你可以将10000本书——一整座图书馆的知识量——攥在手里。这种方法的问题在于，如果末日来临时电网瘫痪，那么你就无法简单地将设备插到墙上充电。到时你很可能会感到无比抑郁，明明人类知识的宝库尽在手中，偏偏却不得其门而入。所以为了解决这个问题，我为自己打造了一款末日版Kindle——不但下载好了重启文明所需的各种必备知识，而且加固了外壳并内置了太阳能电池板。

现在你拥有了一个便携式的实用知识库，当电池电量不足时，你只需要将它放在太阳底下充电即可。当然，屏幕和太阳能电池板不可避免将会老化，但到那时，你所在的幸存者社区应该已经顺利走上了复兴的道路。知识库中保存有如何制作纸张、墨水和简单印刷机的说明，学会之后，你就可以将设备存储的资料还原成书籍这种技术含量较低的形式。

仅仅掌握理论知识还不足以重建运转良好的社会，你还需要合适的

手段和工具才能将理论付诸实践。因此，马尔钦·雅库博夫斯基（Marcin Jakubowski）采取了一种稍微有些不同的策略——设计并制造一组巧妙关联的机器。在他的设想中，这个名为全球农村制造组件（Global Village Construction Set，GVCS）的机器套组共包含50种不同的机器，在功能上互为补充，一旦完成后将成为促进文明的开源蓝图，能够为自给自足的社区提供一切必备的基础设施。这些机器五花八门，简单的有烤箱、锯木机和钻井器，稍微复杂点的有风轮机和使用可再生能源（生物燃料）的蒸汽机，最复杂的则是从黏土中提炼铝的装置和能够熔化钢铁的感应炉。它们将为农业、运输、制造以及能源生产提供全方位的支持。而最巧妙的一点是，GVCS中任何一台机器的维修与制造都可以由其余的机器来完成。雅库博夫斯基原本的目标是帮助发展中国家的农村地区拥有独立的生产手段。但很明显，当末日的幸存者们为了恢复文明而重新建立社区时，这种内部互相支持并且能够满足独立社会所有要求的机器套组也是必不可少的。

所以，如果未来会爆发全球性灾难从而导致工业文明突然崩溃的可能性确实值得引起重视，那么对于现在的我们而言，正确的做法就是立即采取措施，保护人类至今所取得的一切成果的核心部分，即我们花费了几个世纪的时间才积累起来的最为关键的科学知识和技术窍门。这个过程就像是在为我们的整个文明建立备份存档，好让幸存者能够尽快地重新建立一个有竞争力的社会。

空间传送与时间旅行

TELEPORTATION AND TIME TRAVEL

文/吉姆·阿尔-哈里里

我故意为本书的最后一章选择了比较激进的主题。前面的章节主要是在讨论不久的将来几乎必然会实现的技术——许多甚至已经在某种程度上成为现实，当然也有些预言比较悲观，我们应当极力避免这些预言所描绘的未来或者至少对其做好充分的准备。但是，在非常遥远的未来，远到我们已经离开地球家园，开始在宇宙中开辟殖民地，那个时候会发生些什么呢？那些现在只存在于科幻小说中的奇思妙想有可能成为现实吗？从意念交流到超光速引擎，可供我们讨论的内容不胜枚举，但我最终选定了我个人最喜欢的两个主题。几乎可以肯定，我在有生之年看不到它们实现，但在更加遥远的未来……谁知道呢？

空间传送

所谓空间传送，其基本思想是让物体从一个点直接移动到另一个点而不必穿过两点之间的物理空间。这个概念在科幻题材的小说、电影和游戏中出现的时间之早可能出乎你的意料。根据现有资料，最早的空间传送器登场于爱德华·佩奇·米切尔（Edward Page Mitchell）1877年的小说《没有身体的人》。故事中的科学家发明了一台机器，可以将活的生命体分解成原子，然后通过导线将原子像电流一样传送到接收器中，最后在接收器中还原成原来的生命体。这个故事吸引我的部分原因在于当时的人们还不知道电子，甚至对原子的认识也还不够准确。

我们现在来到半个世纪之后的1929年，这一年阿瑟·柯南·道尔（Arthur Conan Doyle）发表了一篇题为《分解机》的短篇小说，在其中提到了一种能够把物质分解然后重新组装的机器。用小说中某个角色的话来说："你能不能想象这样的过程，像你这样的有机生命体以某种方式溶解在宇宙之中，然后只要将实验条件小心地逆转，你就会被再次拼凑出来？"两年后，美国作家查尔斯·福特首次创造了"teleportation"（空间传送）这一说法，用来描述人或物突然消失然后在其他地方重新出现的神秘现象。空间传送是福特研究过的许多"异常现象"——著名的福特现象——之一，与超出了常规科学认知边界的各种神秘超自然现象并列。

美国1958年的科幻恐怖电影《变蝇人》让现代化的空间传送概念被更多的民众所了解。在这部电影中，一名科学家没注意到有只苍蝇跟着他进了传送舱，导致自己的DNA与苍蝇的DNA融合，最终变成了怪物。

然而，对于世界各地的许多人而言，空间传送在科幻世界中最著名、最经久不衰的形象无疑是星舰企业号上的“传送室”，以及那句著名的话：“把我传送过去，斯科特。”这是《星际迷航》的编剧吉恩·罗登贝瑞在20世纪60年代中期想到的主意，但他那时的主要目的其实是节省特效经费。因为相比起让角色乘坐飞行器从企业号上飞下来，渐隐之后直接显现在行星表面的做法更加方便，也更加便宜。

这些当然都很有趣，但在这个问题上严肃的科学有什么能说的吗？将物质从一个地方传送到另一个地方而不穿过两地之间的空间，这样的想法听上去似乎很荒谬，但如果你处在量子尺度，这其实是一件很平常的事。有一种名为量子隧穿的过程允许像电子这样的亚原子粒子从一个位置跳到另一个位置，即使它没有足够的能量。它有点像这样一个过程：你把球朝着一堵砖墙扔过去，球在空中消失然后重新出现在了墙的另一侧，在此期间墙面始终完好无损。这绝对不是科幻小说中的情节。事实上，我们的太阳之所以能发光放热，为地球上的所有生命提供能量，根本原因就在于氢原子可以通过量子隧穿的方式穿透原本固若金汤的力场从而发生核聚变。

但其实量子力学还有一个更有趣、更违反直觉的预言，即已经经受了无数次实验验证的量子纠缠。在介绍量子计算的那一章，温弗里德·亨辛格已经对此做了介绍。根据量子纠缠的描述，两个或者更多个在空间上彼此分离的粒子可以存在紧密关联，任何一个粒子受到测量或扰动，与它成对的另一个粒子也会在瞬间受到影响，无论相距多远。爱因斯坦的相对论认为，信息传递速度不能超过光速，而量子纠缠现象似乎突破了这一限制。量子力学对此的解释为，纠缠的粒子不是互相独立的实体，而是单个系统的一部分。

请考虑下面的类比。把一副手套的两只分别装进两个盒子里，其中一个盒子留在身边，另一个盒子则让朋友带去远方。如果你打开身边的盒子发现了一只左手手套，那么你立刻就能知道另一个盒子里的手套是右手的。这个故事当中自然没有任何神秘之处，因为唯一发生变化的就是你的知识状态——无论你知道与否，另一个盒子里总是装着那只右手手套。但在量子世界中，当手套被纠缠的粒子所取代，情况就会变得极为不同，因为在一个粒子身上，自旋向上和自旋向下这两种状态可以同时存在，即所谓的量子叠加。你打开身边盒子的过程实际上就是在执行名为量子测量的操作，这一操作将迫使粒子从两种自旋方式中“决定”一种。毕竟，我们观测到的粒子总是以某种特定的方式自旋——否则也太荒谬了，不是吗？量子力学的理论告诉我们——并且实验也向我们证实——量子叠加是真实存在的。而更为重要的是，一旦你打开身边的盒子检查其中的粒子，另一个盒子中的粒子也会立即从两个自旋方向同时存在的叠加态坍缩成自旋方向唯一的状态，而且这个自旋方向恰好与第一个粒子相反。你打开盒子的动作仿佛向另一个盒子中的粒子发出了量子信号，让它瞬间就知道自己该如何表现。

叠加和纠缠很自然地会让我们想到量子空间传送。这个构想能在现

实中实现吗？量子空间传送的大致思想是，先使纠缠的粒子分处两地，然后扫描你想要传送的物体以获取其信息，最后通过纠缠粒子对将这一纯粹的信息传送至远处。

但即使是传送单个原子我们也需要获得它完整的量子态信息——基本上我们需要知道它的一切。最初科学家们认为这是不可能实现的，因为有一个叫作海森堡不确定性的基本原理指出，我们永远无法扫描一个量子系统以获得能够在其他地方将其重现的全部信息。然而，量子纠缠却为此提供了一套解决方案。信息中的一部分可以在量子水平实现即时传送，我们无须知道这部分信息的具体内容。作为补充，我们还要扫描粒子的状态，并将测得的信息独立地发送到另一端。将这两部分信息（借助纠缠对传输的量子信息以及通过扫描获得且以光速传输的经典信息）组合在一起，我们就能在另一端使用同样的原材料重建最初的物体。

1993年，由IBM研究员查尔斯·班尼特（Charles Bennett）领导的六人国际科研团队首次证明，可以利用量子纠缠将粒子的状态传送到遥远的地方，量子空间传送的现代概念也就此诞生，被称为量子隐形传态。自那之后，科研人员一直在努力让越来越多的原子实现纠缠。然而，虽然我们可以传送几个光子或一束原子（需要把特殊种类的气体冷却至接近绝对零度），但是真正的问题在于，人类的身体由数万亿原子构成，我们必须使用巨量信息才能描述这么多原子的特定排布，而利用量子纠缠传送如此巨量的信息无疑是件困难得多的任务。

需要指出，空间传送并不仅仅意味着创建原始粒子的复制品。至少在量子水平上，传输粒子的所有信息就相当于传输粒子本身：我们不需要将原始粒子进行物理意义上的转移。但我们必须清楚，真正的空间传送需要先将A处的物体销毁，再在B处将其重现。最近有一项称为粒子空间传送的初步研究，该研究表明我们有望更进一步，实现物体本身的量子传送。

但请注意，不管怎样，《星际迷航》中的技术可能还得等几个世纪才能出现。

时间旅行

空间传送依赖于量子力学——描述物质微观行为的物理理论，而时间旅行则源于从宏观尺度描述宇宙的理论：爱因斯坦的广义相对论。

作为我们目前用来描述时空性质的最出色、最准确的理论，广义相对论没有完全排除时间旅行的可能性，因此我们可以严肃地讨论这个话题。广义相对论告诉我们，物质和能量会导致时间和空间发生拉伸和翘曲。事实上，广义相对论在数学上允许非常奇特的时空形状存在，例如黑洞和虫洞。有一个叫作闭合类时曲线的概念与时间旅行密切相关，这

种曲线穿透翘曲时空形成封闭回路，时间会朝自身发生弯曲。沿着这样的路径前行，你会觉得时间像往常一样流逝，但是当你走了一圈返回出发地时却会发现，这时的时间甚至要早于你的出发时间，这实际上就意味着你回到了过去。这样的时间回路就构成了大多数时间旅行思想的理论基础。

虽然许多物理学家认为这种时间回路是“非物理的”，但也有些学者不愿轻易放弃。爱因斯坦广义相对论方程的第一个时间回路解由W. J.范·施托库姆（W. J. van Stockum）于1937年发表。施托库姆假设真空中存在一个无限长的圆柱体，它的内部填充了致密的材料，并且保持高速旋转。这种情况下的数学方程做出预言，圆柱周围的时空区域会发生扭曲，因此其中将包含时间回路。不幸的是，这样的圆柱体不可能在客观物理世界中存在，因为它会赋予时空某些非常奇怪的属性，整个宇宙都会受到影响，而我们知道现实宇宙并不具有那些属性。

奥地利裔美国籍数学家库尔特·哥德尔（Kurt Gödel）曾在普林斯顿大学高级研究所与爱因斯坦共同工作，他于1949年提出了另一种假设情景，该情景与广义相对论完全兼容并且其中包含有时间回路。然而不管是当时还是现在，大多数物理学家都认为旅行到过去可能造成的逻辑悖论足以令我们将其否决，时间旅行的可能性之所以无法完全消除只是因为现在的物理定律中还存在漏洞，而随着我们的认识更加深入，这些漏洞终将被填上。这种深入认识可能会源于量子引力理论的出现，即当今物理学最重要的两大理论——量子力学和广义相对论——的统一。到目前为止，我们还没有找到这种所谓的“万物理论”，不过科学家们正在孜孜不倦地追寻。

到了20世纪60年代和70年代，研究广义相对论解的理论物理学家发现了更多包含时间回路的理论模型。所有模型涉及的天体都因为高速旋转而扭曲了周围的时空。其中最为著名的是弗兰克·蒂普勒（Frank Tipler）提出的模型，他在1974年发表了一篇论文，对施托库姆的旋转圆柱体做了改进。蒂普勒的圆柱体长100千米，宽10千米。它由密度极大的奇特材料制成，具有非常大的强度和刚度。这一方面是为了让它能够保持圆柱体的形状，不至于被惊人的引力压扁，另一方面则是为了提供巨大的向心力以防止外层物质向外抛射，毕竟当圆柱体高速旋转时，外层物质的线速度可达到光速的一半。尽管听上去似乎很难实现，但蒂普勒指出，所有的困难都可以随着技术的进步而得到解决。

那么我们要如何把蒂普勒的圆柱体当作时间机器来使用呢？你需要做的就是乘坐飞船接近那个高速旋转的圆柱体，然后绕着它飞几圈，那么当你返回地球时就有可能发现自己回到了过去。至于你回到了多远的过去，则取决于你绕着圆柱体飞了多少圈。也就是说，虽然你绕圈时感觉时间是正常流逝的，但是从你所在的翘曲时空之外的区域来看，你其实是在不停地向过去移动。这有点像你明明在向上爬一个螺旋阶梯，结果却发现每爬完一圈都会来到下面一层。

你可能认为，想要在宇宙尺度上操纵物质来建造这样的设备基本上是不可能实现的。然而，天然的蒂普勒圆柱体或许已经存在于宇宙中了。这种存在性极具争议的对象叫作宇宙弦，部分宇宙学家认为它们是宇宙大爆炸遗留下来的产物。宇宙弦既可以形成闭环，也可以延展至整个宇宙，它们的厚度比原子还小，但是密度极大，每毫米的重量可达一百万亿吨。

美国天体物理学家理查德·高特（Richard Gott）关于时间旅行做了大量思考，他证明当两条宇宙弦以恰当的角度高速经过彼此时，附近就会形成一个时间回路。

最后，说到时间旅行，我们能想到的最可行（或许我应该说最不荒谬）的方式似乎是穿越虫洞。根据广义相对论，宇宙中可能存在名为虫洞的理论实体，它们是时空中的奇异结构。我们可以将虫洞视为穿越时空的捷径，连通空间中不同的区域，而其路径则存在于我们宇宙之外的维度中。由于时间与空间密切相关，原则上虫洞的两端也可以连接两个不同的时间——一个是另一个的过去。根据方向的不同，穿过虫洞你就可以旅行到过去或者未来。

不同于已有大量观测证据的黑洞，虫洞目前仍然只是个有趣的理论模型。尽管如此，有一天我们或许会有能力制造一个虫洞。当然，这一天也有可能永远不会到来，至少这不会是能够在21世纪实现的目标。但是，请允许我给出一些猜测。当我们眼中的尺寸变得极小，比原子的尺寸还小数万亿倍时，我们就触到了所谓的普朗克尺度。在这一尺度下，时间和空间的概念将失去意义，量子不确定性将成为主宰一切的力量。在这里，所有已知的物理定律都会失效，时空会形成一切可能的形状，以一切可能的方式扭曲，像跳一支随机而狂乱的舞蹈般瞬起瞬灭。科学家们虽然发明了“量子涨落”和“量子泡沫”之类的术语，但这些词很难体现普朗克尺度下发生的这种行为的疯狂程度。在这个泡沫内，微型虫洞会短暂地出现，然后迅速地消失，我们的目标就是设法捕获其中的一个，趁它消失前把它放大许多倍。

那么，什么才是我们能够相信的呢？虫洞可以制造吗？虫洞可以成为时间机器吗？时间回路可以在我们的宇宙中形成，让我们旅行到过去吗？事实是，现在的我们还完全无法确定，但我对此保持乐观。弗兰克·蒂普勒发表了第一篇关于如何建造时间机器的严肃论文，他曾经写过这样一段戏谑的文字：

笔者认为，任何已知的物质、机械和力都无法组合成一台可用的机器，让人能够[回到过去]，同任何其他物理事实一样，我们可以完全证明这一点。

这句话并不是蒂普勒的原创，而是改编自天文学家西蒙·纽科姆（Simon Newcomb）早年的断言，只要把方括号中的“回到过去”改为“在空中长距离飞行”就成了纽科姆的原话。他曾经坚定地认为，比空

气重的飞行器是不可能实现的，为此在19世纪末、20世纪初的时候发表了多篇论文试图证明这一观点。后面的事情大家都知道，莱特兄弟没过多久就证明了纽科姆的断言是错误的。我想看看，是否有一天同样的故事会以时间旅行为主角再次上演。我不愿意花太多钱打赌人类终有一日将建成时间机器，但我一直秉持这样的观点：如果我们最好的科学理论不能完全驳斥时间旅行的可能性，那么想象它会以怎样的方式实现将是一件有意义也很有趣的事。

本章的最后，我想向各位介绍一个激动人心的想法：也许，仅仅是也许，空间传送和时间旅行之间有着十分密切的联系。一部分理论物理学家正在认真思考这个想法的细节，他们将这个想法记为ER＝EPR，表示量子纠缠（关系到空间传送）和虫洞（关系到时间旅行）之间存在着深刻联系。1935年，爱因斯坦和他的合作者发表了两篇在随后很长一段时间里都被认为完全无关的论文，但它们其实可能是在描述同样的概念。第一篇被称为EPR（爱因斯坦——

Einstein、波多尔斯基——Podolsky和罗森——Rosen三位作者的姓氏首字母）的论文首次描述了量子纠缠的古怪特性，即两个相距遥远的粒子可以在瞬间发生关联，而在爱因斯坦看来这是不可能的，因此他认为量子纠缠的存在暗示了我们对于量子理论的理解还不完全。第二篇被称为ER（爱因斯坦——Einstein和罗森——Rosen两位作者的姓氏首字母）的论文则首次介绍了虫洞的概念，因此后世也常把虫洞称为爱因斯坦-罗森桥。

在这两篇论文发表了八十多年后的今天，我们提出了一个大胆的问题：有没有可能量子纠缠对能够“交流”的根本原因是它们通过虫洞连接在了一起？相关的文章读得越多，思考得越是深入，我就越喜欢这个疯狂的想法。它真是太漂亮了。因此，如果虫洞在物理上可以实现，它就能够同时充当空间传送器和时间机器。世界上还有比这更酷的事情吗？

当然，就目前而言，本章的主题还牢牢地局限在科幻小说的范畴内——当然也存在于勇敢的理论物理学家所要面对的数学方程式里。

无论结果如何，我完全相信在未来的几十年、几百年里，科学会带给我们大量的惊喜。

所以，让我们合理地使用我们的新知识吧。

作者简介

吉姆·阿尔-哈里里（Jim Al-Khalili），物理学家，作家，节目主持人，曾被授予大英帝国官佐勋章（OBE），现为萨里大学理论物理学教授。其研究与写作集中于核物理学、量子生物学领域，除此之外，他还主持了多档科学主题类的电视广播节目，其中包括BBC广播四台的周播节目《科学家的人生》（*The Life Scientific*）。他于2007年获得英国皇家学会迈克尔· 法拉第奖（Royal Society Michael Faraday Prize），于2016年获得首届斯蒂芬·霍金科学传播奖（Stephen Hawking Medal for Science Communication）。

菲利普·鲍尔（Philip Ball），作家，先后在牛津大学、布里斯托大学获得化学、物理学专业学位，曾作为编辑，在《自然》杂志任职多年。现在，他定期撰写科普文章，值得一提的是，他十分关注与艺术文化有关的科学话题，著有《明亮的泥土：颜料发明史》（*Bright Earth: the Invention of Colour*）、《好奇心：科学何以执念万物》（*Curiosity: How Science Became Interested in Everything*），以及《音乐本能》（*The Music Instinct*）、《隐形：看不见的危险诱惑》（*Invisible: The Dangerous Allure of the Unseen*）等书。其中，《预知社会：群体行为的内在法则》（*Critical Mass*）获得了2005年的英国皇家学会科学图书奖。同时，他还是BBC广播四台的《科学故事》（*Science Stories*）节目的主持人，最新作品名为：《水的国度：不为人知的中国历史》（*The Water Kingdom: A Secret History of China*）。

玛格丽特·A. 博登（Margaret A.Boden），萨塞克斯大学认知科学教授，帮助建立了全球首个认知科学专业，曾被授予大英帝国官佐勋章。她获得了医学、哲学和心理学的学位，并在研究中将这些专业与人工智能做了结合。她是英国国家学术院（the British Academy）、美国人工智能协会（Association for the Advancement of Artificial Intelligence）及其英国、欧洲同类协会的成员，其作品被翻译成20种语言，最新一本作品名为《AI：人工智能的本质与未来》（*AI: Its Nature and Future*）。

娜奥米·克莱默（Naomi Climer），工程师，专攻广播和通信技术，曾任职于BBC、英国独立电视台、索尼英国技术中心（Sony's UK Technology Centre），她是英国工程技术学会（IET）的前任主席，英国国立电影电视学院董事，国际广播电视技术展览会（IBC）的理事会主席，索尼英国技术中心的董事会顾问。

刘易斯·达特内尔（Lewis Dartnell），威斯敏斯特大学太空生物学教授，主要研究火星上存在微生物的可能性（火星地表暴露在宇宙射线下），以及我们该如何进行探测。同时，他还经常受邀参加各种科普节目，著有《宇宙中的生命：新手指南》（*Life in the Universe: A Beginner's Guide*）和《世界重启：大灾变后，如何快速再造人类文明》（*The Knowledge: How to Rebuild our World from Scratch*），后者曾被《星期日泰晤士报》评为“年度好书”。

杰夫·哈迪（Jeff Hardy），伦敦帝国理工学院格兰瑟姆气候变化与环境研究所（Grantham Institute Climate Change and the Environment）高级研究员，主要研究未来的低碳经济模式，以及该模式与人们的日常生活和商业运营之间的关系。在此之前，他是英国天然气和电力市场管制局（OFGEM）未来可再生能源研究办公室（Sustainable Energy Futures at the UK energy regulator）的主管，联合国政府间气候变化专门委员会第三工作组（Science for Work Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change）的科学项目主管。目前，他仍在英国能源研究中心（UK Energy Research Centre）、英国皇家化学学会（Royal Society of Chemistry）、约克大学绿色化学中心（the Green Chemistry Group at the University of York）担任职务，同时还是已停止运行的塞拉菲（Sellafield）核工业区的核能实验室的化学研究员。

温弗里德·K.亨辛格（Winfried K. Hensinger），萨塞克斯大学量子技术教授，他不仅领导着萨塞克斯大学的离子、量子技术研究小组（Ion Quantum Technology Group），而且还是萨塞克斯大学量子技术中心（Sussex Centre for Quantum Technologies）主管。在昆士兰大学攻读博士学位期间，他曾加入诺贝尔物理学奖得主威廉·菲利普斯（William Phillips）的团队，在美国国家标准与技术研究院（NIST）进行研究。2017年，他和团队公布了一份建造大型量子计算机的技术蓝图，目前他们也正在尝试据此进行搭建。

亚当·库哈尔斯基（Adam Kucharski），伦敦卫生与热带医学院副教授，主要以数学建模研究传染病暴发。他曾就读于英国顶尖研究型大学华威大学，后获得剑桥大学数学专业博士学位。作为2012年的威康信托基金会科学写作奖（Wellcome Trust Science Writing Prize）获得者，他一直为《观察者报》（*the Observer*）、《新科学家》（*New Scientist*）、《连线》（*Wired*）等报纸杂志供稿。2016年，其处女作《完美博弈：拉斯维加斯的概率论、混沌理论与行为科学》（*The Perfect Bet: How Science and Maths Are Taking the Luck Out of Gambling*）出版。

约翰·迈尔斯（John Miles），剑桥大学伊曼纽尔学院（Emmanuel College）院士，奥雅纳工程咨询公司（Arup）、英国皇家工程学院（Royal Academy of Engineering）与剑桥大学共同设立的能源转型策略研究部门专家。他主要研究未来运输技术及其对经济发展的影响，尤

其关注能源效率和环境效应。他也是英国汽车工业协会（UK Automotive Council）的创始人之一，曾领导协会下的智能运输系统研究小组（Working Group on Intelligent Mobility），提交了关于未来智能运输技术的发展路线图与研究报告。

安娜·普洛萨伊斯科（Anna Ploszajski），材料学家，工程师，科普工作者。她经常表演以材料学为主题的脱口秀，同时运营一个名为'rial talk的播客节目，为《材料世界》（*Materials World*）等期刊撰写文章。2017年，她获得了英国皇家工程学院的杰出青年工程师奖（Young Engineer of the Year），并成功进入全球颇负盛名的趣味科普比赛“科学一叮”（FameLab）的英国区决赛。她还喜欢吹小号，现在正在练习游泳，计划游过英吉利海峡。

阿拉蒂尔·普拉萨德（Aarathi Prasad），分子遗传学家和作家，为BBC电视一台、BBC广播四台、英国第四台、国家地理频道、探索频道策划并主持了多部纪录片，著作颇丰，《接骨师的候诊室：印度医学之旅》（*In the Bonesetter's Waiting-Room: Travels in Indian Medicine*）是她的代表作。

路易莎·普雷斯顿（Louisa Preston），伦敦大学伯贝克学院天体生物学家，英国航天局（UK Space Agency）“极光”计划（Aurora Research）成员，参与美国、加拿大等多个国家的航天局研究项目，主要研究地球上的生命体如何在恶劣的环境中生存下来，以此作为地外生物和栖息环境的研究参考。她还积极进行科学普及，曾在2013年的TED大会上与大家讨论如何寻找火星生命，其处女作名为《金凤花与水熊虫：在宇宙中搜寻生命》（*Goldilocks and the Water Bears: The Search for Life in the Universe*）。

亚当·拉瑟福德（Adam Rutherford），遗传学家、作家，BBC广播四台的王牌科普节目《科学内幕》（*Inside Science*）主持人。他还是多部电影的科学顾问，包括《僵尸世界大战》（*World War Z*，2013年）和亚历克斯·嘉兰导演的奥斯卡获奖作品《机械姬》（*Ex Machina*，2015年）；著有《我们人类的基因：全人类的历史与未来》（*A Brief History of Everyone Who Ever Lived: The Stories in Our Genes*）等作品。

诺埃尔·夏基（Noel Sharkey），谢菲尔德大学人工智能与机器人学荣誉教授，负责任机器人基金会（Foundation for Responsible Robotics）联合创办人，非政府国际自治武器控制协会（the NGO: International Committee for Robot Arms Control）主席，BBC《机器人大擂台》（*Robot Wars*）节目主裁判。他自如地游走于各学科间，从人工智能到语言学、计算机科学，从机器学习到工程学、机器人学和技术伦理研究。在谢菲尔德大学之外，他还在埃塞克斯大学、埃克塞特大学、耶鲁大学和斯坦福大学授课和做研究。

达姆·朱莉娅·斯林戈（Dame Julia Slingo），气象学家和气候学家，

英国皇家学会会员（FRS），美国国家工程院（US National Academy of Engineering）外籍成员，2009—2016年英国气象局（the Met Office）首席专家。运用更为先进的方法解读天气现象、预测天气、为气候建模贯穿了她的职业生涯，她也十分关注热带气象和气候异变。

加亚·文斯（Gaia Vince），专精于科学、社会和环境主题写作的自由撰稿人和电视广播节目主持人。她的文章发表于英国、美国、澳大利亚的多家刊物，她还曾是《自然》《新科学家》和《自然气候变化》（*Nature Climate Change*）的编辑。2015年，其处女作《人类世的冒险之旅：穿越我们塑造的世界之心》（*Adventures in the Anthropocene: A Journey to the Heart of the Planet We Made*）获得英国皇家学会科学图书奖。

马克·沃克（Mark Walker），新墨西哥州立大学哲学系教授，曾获得校内理查德·L. 赫登进步哲学奖学金（Richard L. Hedden Chair of Advanced Philosophical Studies）。2013年，他的第一本书《给所有人的快乐药丸》（*Happy-People-Pills for All*）建议为大众制造增加幸福感的药物。他最新的一本书《给所有人的钱》（*Free Money for All*）在2015年出版，建议为每一个美国人提供一笔金额达10000美元的“基本收入”。

艾伦·伍德沃德（Alan Woodward）原本是一位物理学家，他在攻读硕士学位期间因科研需要而接触信息科学，对计算机的了解与日俱增，后成为一名计算机安全专家。在英国政府部门工作多年后，他开始在企业从事网络安全工作。之后，他回归学术领域，在萨里大学做客座教授，也担任如欧洲刑警组织等机构的顾问。他是网络安全领域的著名专业人士，他的工作涉及从量子物理到计算机科学的多个领域和层面。

延伸阅读

第一部分　地球的未来

1. *Adventures in the Anthropocene: A Journey to the Heart of the Planet We Made*, Gaia Vince, Vintage, 2016.

2. *Climate Change (What Everyone Needs to Know)*, Joseph Romm, Oxford University Press, 2015.

3. *The Future*, Al Gore, WH Allen, 2014.[6]

（中文版《未来：改变全球的六大驱动力》2013年由上海译文出版社出版，译者：冯洁音、李鸣燕、毛云）

4. *Homo Deus: A Brief History of Tomorrow*, Yuval Noah Harari, Harvill Secker, 2016.

（中文版《未来简史》2017年由中信出版社出版，译者：林俊宏）

5. *Population 10 Billion*, Danny Dorling, Constable, 2013.

6. *Scale: The Universal Laws of Life and Death in Organisms, Cities and Companies*, Geoffrey West, Weidenfeld & Nicolson, 2017.

（中文版《规模：复杂世界的简单法则》2018由中信出版社出版，译者：张培）

7. *Smart Cities, Digital Nations: Building Smart Cities in Emerging Countries and Beyond*, Casper Herzberg, Roundtree Press, 2017.

8. *Tomorrow's World: A Look at the Demographic and Socio-Economic Structure of the World in 2032*, Clint Laurent, Wiley, 2013.

第二部分　我们的未来

9. *Citizen Cyborg: Why Democratic Societies Must Respond to the Redesigned Human of the Future*, James Hughes, Basic Books, 2004.

10. *Creation: The Origin of Life / The Future of Life*, Adam Rutherford, Penguin, 2014.

11. *The Gene: An Intimate History*, Siddhartha Mukherjee, Vintage, 2017.

（中文版《基因传：众生之源》2018年由中信出版社出版，译者：马向涛）

12. *Happy-People-Pills for All*, Mark Walker, Wiley, 2013.

13. *Life at the Speed of Light: From the Double Helix to the Dawn of Digital Life*, J. Craig Venter, Little, Brown Book Group, 2013.

（中文版《生命的未来：从双螺旋到合成生命》2016年由浙江人民出版社出版，译者：贾拥民）

14. *The Patient Will See You Now: The Future of Medicine Is in Your Hands*, Eric Topol, Basic Books, 2016.

（中文版《未来医疗：智能时代的个体医疗革命》2016年由浙江人民出版社出版，译者：郑杰）

15. *Spillover: Animal Infections and the Next Human Pandemic*, David Quammen, Vintage, 2013.

（中文版《致命之旅：全球大型传染病探秘之旅》2014年由中信出版社出版，译者：刘颖）

16. *Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies*, Nick Bostrom, Oxford University Press, 2016.

（中文版《超级智能：路线图、危险性与应对策略》2015年由中信出版社出版，译者： 张体伟、张玉青）

第三部分　网络的未来

17. *AI: Its Nature and Future*, Margaret A. Boden, Oxford University Press, 2016.

（中文版《AI：人工智能的本质与未来》2017年由中国人民大学出版社出版，译者：孙诗惠）

18. *Cloud Computing* (MIT Press Essential Knowledge Series), Nayan B. Ruparelia, MIT Press, 2016.

19. *Computing with Quantum Cats: From Colossus to Qubits*, John Gribbin, Bantam Press, 2014.

20. *The Economic Singularity: Artificial Intelligence and the Death of Capitalism*, Calum Chase, Three Cs, 2016.

（中文版《经济奇点:人工智能时代,我们将如何谋生》 2017年由机械工业出版社出版，译者：任小红）

21. *Enchanted Objects: Design, Human Desire and the Internet of Things*, David Rose, Scribner, 2015.

22. *The Technological Singularity*, Murray Shanahan, MIT, 2015.

（中文版《技术奇点》2016 年由中信出版社出版，译者：霍斯亮）

第四部分　制造的未来

23. *The Industries of the Future*, Alec Ross, Simon & Schuster, 2017. Innovation and Disruption at the Grid’s Edge, Fereidoon Sioshansi (ed.), Academic Press, 2017.

（中文版《新一轮产业革命：科技革命如何改变商业世界》2016年由中信出版社出版，译者：浮木译社；校译：何玲）

24. *Innovation and Disruption at the Grid's Edge*, Fereidoon Sioshansi (ed.), Academic Press, 2017.

25. *Made to Measure: New Materials for the 21st Century*, Philip Ball, Princeton University Press, 1999.

26. *Stuff Matters: The Strange Stories of the Marvellous Materials that Shape Our Man-made World*, Mark Miodownik, Penguin, 2014.

（中文版《迷人的材料：10种改变世界的神奇物质和它们背后的科学故事》2016年由北京联合出版公司出版，译者：赖盈满）

27. *We Do Things Differently: The Outsiders Rebooting Our World*, Mark Stevenson, Profile, 2017.

第五部分　遥远的未来

28. *Black Holes, Wormholes and Time Machines*, Jim Al-Khalili, CRC Press, 2012.

29. *Emigrating Beyond Earth: Human Adaptation and Space Colonization*, Cameron M. Smith, Springer, 2012.

30. *Global Catastrophic Risks*, Nick Bostrom and Milan M. Cirkovic, Oxford University Press, 2011.

31. *The Knowledge: How to Rebuild Our World After an Apocalypse*, Lewis Dartnell, Vintage, 2015.

（中文版《世界重启：大灾变后，如何快速再造人类文明》2015年由北京联合出版公司出版，译者：秦鹏）

32. *Packing for Mars: The Curious Science of Life in Space*, Mary Roach, Oneworld, 2011.

33. *Physics of the Future: The Inventions That Will Transform Our Lives*, Michio Kaku, Penguin, 2012.

（中文版《物理学的未来》2012年由重庆出版社出版，译者：伍义生、杨立盟）

[1] 此处出现的英文标题为对应章节的原标题，后同。——编者注

[2] 指《刀锋战士》电影。原书此处括注内容翻译如下：还有菲利普·K.迪克（Philip K. Dick）的小说，这部电影据此改编。——编者注

[3] arribada，指某些种类的海龟同时在同一地点大规模筑巢的现象。——译者注

[4] planetary problem，群体中某一个体比其他个体质量大得多时的多体问题。——译者注

[5] 美国于2017年6月宣布退出《巴黎协定》。——编者注

[6] 本书第一版2013年由兰登书屋出版。——译者注



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的
泛阅读服务



专属社群 独家福利
精品共读 活动特权

手机扫码
加入未读 Club 会员计划

未讀

当科技开始影响我们的进化，如何选择才是对的？

LES ROBOTS FONT-ILS L'AMOUR ?

给未来人类的终极12问

Laurent Alexandre
Jean-Michel Besnier



12 场科学与哲学的激辩，12 番技术与伦理的碰撞
对这 12 个问题的回答，将决定人类的走向

要优化人种吗？应该改变生殖方式吗？未来是赛博格的天下吗？
你希望长生不老吗？可以和机器人做爱吗？人工智能会杀人吗？……

也许没有标准答案，但你不应缺席讨论

LES ROBOTS FONT-ILS L'AMOUR ?
Le transhumanisme en 12 questions

〔法〕洛朗·亚历山大 —— 著
〔法〕让-米歇尔·贝尼耶 —— 著　张芳 —— 译

北京联合出版公司

版权信息

给未来人类的终极12问

Les robots font-ils l'amour? Le transhumanisme en 12 questions

作者：[法] 洛朗·亚历山大（Laurent Alexandre） [法] 让-米歇尔·贝尼耶（Jean-Michel Besnier）

译者：张芳

出品方：未读·探索家

出版社：北京联合出版公司

目录

版权信息
序言
作者简介
1 有必要优化人种吗
2 人类应该改变生殖方式吗
3 技术能否修复万物
4 未来是赛博格的天下吗
5 我们可以和机器人做爱吗
6 长生不老真的让人向往吗
7 超人类主义是优生学吗
8 人工智能会杀人吗
9 经济会面临怎样的挑战
10 需要制定规则吗
11 我们应该畏惧一个“美丽新世界”吗
12 我们的研究将去向何处
返回总目录

序言

增强人，合成生物学，仿生假肢，人工智能……科技正以惊人的速度向前发展。这些在十年前还只属于科幻领域的主题，如今已是实验室里非常热门的研究课题。基于人工智能制造的机器显示出了非凡的力量。随着国际象棋选手加里·卡斯帕罗夫[1]在1997年败给了IBM公司创造的“深蓝”（DeepBlue），以及围棋选手李世石在2016年输给了谷歌公司发明的“阿尔法狗”（AlphaGo），人类智慧能够超过机器智慧的领域变得更少了。

随之而来的是巨大的经济转型。用一个再长的清单，也不足以列举出所有会被自动化浪潮彻底颠覆的职业。与19世纪的蒸汽机和20世纪下半叶的机器人分别占领工业领域不同的是，这些新机器替代的不是人类劳动，而是我们迄今所能想到的属于人类的特性：认知、判断、分析乃至推理论证。

这惊人的技术加速得益于四个原先各自独立发展的学科的融合：从原子层面操纵物质的纳米技术（Nanotechnology）；塑造生物的生物技术（Biotechnology）；信息技术（Information Technology），尤其是它最为基础的领域；最后是关注人脑机能的认知科学（Cognitive Science）。这四个学科（简称NBIC）的高速发展让我们得以构想一个史无前例的普罗米修斯式的计划，这也是本书的主题：改造人类、完善人类、增强人类并最终超越人类。

硅谷是NBIC革命的核心，在这里极具影响力的超人类主义者们认为，运用技术对人种进行改良，是智人不被自己所创造的机器超越的唯一机会。事实上，人类与机器之间的交融已经开始了：我们会想起嘉玛（Carmat）公司[2]制造的人工心脏，已经被植入多位心脏功能不全的患者体内。而这只是开启未来几十年内诸多可能性的序曲：干预人类DNA以消除其中的致病序列，借助3D打印技术制造人体器官，利用磁力对人类大脑进行刺激，把人体机能与人工智能设备进行耦合，像放大物理力量一样增强感知能力。甚至对一些人来说，考虑到人类的寿命有可能会无限延长，也是时候考虑安乐死了。

尽管这些展望让超人类主义者兴奋不已，信奉其他思想观点的人却对此感到担忧。当一个人与机器连接且无法分割的时候，他的自由意志还能剩下点儿什么？活一千年当真是人类所期望的吗？“增强人”和普通人该如何共同生活？难道不该对某种可能会出现的生物极权主义感到担忧，就像阿道司·赫胥黎[3]在其作品《美丽新世界》中描述的那样吗？这本书在他那个时代（1932年）属于纯科幻，但在今天看来，却像是从现

实角度预测我们可能会面对的未来。

对于这些问题，我们尚未达成一致。我们多次公开讨论过这些问题，针锋相对，你来我往，然而并没有用：我们还是存在着根本的分歧。尽管如此，我们还是能注意到，辩论时，我们的立场在两点上取得了一致，也是非常基本的两点：有理有据且尊重对方观点的讨论是非常重要的；以及我们坚信，技术本身并没有好坏之分，一切都取决于人类如何使用它。

正是这样的认识促使我们以对话体的形式撰写本书。希望读者们不要期望能在书里找到一个最终的和解，一个突如其来的共识。不，这本书是一场辩论，一场坚定的论战，一场激烈的争论，如同古希腊人为了他们最广泛的民主利益而发起的论战一样。我们最大的希望就是，我们的对话能促使探讨NBIC技术的民主辩论更加热烈，毕竟这些技术将给人类带来巨大的挑战。

洛朗·亚历山大和让-米歇尔·贝尼耶

作者简介

洛朗·亚历山大（Laurent Alexandre）

——外科医生/企业家/作家

出生于医生世家，巴黎第六大学（现索邦大学）医学博士毕业。他对超人类主义运动和人类可能会因此遭遇的变革非常感兴趣，也关注生物技术领域所取得的进步。他经常在公众媒体上发表自己对这些问题的看法：他在TEDxParis上发表过名为《死亡的退却：永生很快到来？》的主题演讲。他还为多家报纸杂志供稿，包括《世界报》《赫芬顿邮报》《快报》等。

让-米歇尔·贝尼耶（Jean-Michel Besnier）

——哲学家/大学教授/作家

兰斯大学政治学博士，巴黎第四大学（现索邦大学）哲学系名誉教授，主要研究方向是技术哲学，探讨科学技术对个人和集体的呈现及想象会造成怎样的伦理影响。他是法国科学技术高等研究院科学理事会成员，法国国家图书中心科技文学委员会成员。他撰写过众多科普读物。

1　有必要优化人种吗

“人类成为一个造物者，一个现象发明家；凭借未来实验科学的进步，人类可以从自然中获得力量，而在这方面，我们不知道如何为之设限。”

——克劳德·伯纳德[4]，1865

一场技术革命正在进行：一场关于纳米技术、生物技术和人工智能融合的革命。它使改造人类身体、提升大脑性能成为可能。技术可以创造出一个增强人，而且相关技术会越来越完善。但是应该这样做吗？

洛朗·亚历山大（以下简称洛朗）：科技的功能就是保障人类的美好生活，改善人类的生活条件。没有人会反对医学的进步，因为它可以不断延长人类的寿命，并一直持续下去。在科技水平允许的情况下，有很多理由能说服我们去认同弥补人类自身生理缺陷的做法。以视网膜疾病为例，三分之一的法国人到了一定年纪眼底会出现黄斑病变。这种疾病会损害视网膜中心进而导致失明。目前，法国罹患该病的人数已超过一百万，这个数字还会随着人口的老龄化而急剧增长。除了眼底黄斑病变，还有其他几种视网膜病变会导致失明，且尚无任何有效的治疗手段。不过，仰赖电子技术和生物技术的进步，今后我们可以更为有效地治疗这种严重的疾病。为什么要放弃这些技术呢？

科技有望治疗失明

针对年龄性黄斑病变（DMLA）的治疗手段分为两类。第一类是把电子植入物与一个微型摄像机连通，并将其固定在视网膜上，或直接固定在大脑皮层上。该方法沿用了通过移植人工耳蜗治疗耳聋的思路。目前，这种仿生眼只能让病人获得非常有限的视力，但是随着微型处理器和电子传感器不断更新换代，人类有望在2025年之前使用具有数万像素的植入物，这能给患者带来真正的视觉舒适。

第二类结合了两种不同的生物技术，即干细胞技术和基因疗法。2011年4月，一个日本团队在《自然》杂志上发文，宣称可以

从胚胎干细胞中培育出小鼠的视网膜锥形结构。干细胞技术可在2025年前后用于治疗人类的视网膜疾病。与此同时，基因疗法给身患遗传性视网膜病变的年轻人带来了希望。发生视网膜色素变性的狗在接受了初步的基因治疗后，其视网膜功能就已恢复正常，这超出了所有人的预期。针对人眼的实验也已经展开：2012年年初发表的一项实验性基因疗法，恢复了三位莱伯先天性黑蒙患者的部分视力。莱伯先天性黑蒙是一种令人孤绝无助的疾病，它是一种无法治愈的视网膜感受器的变性，会导致病人在30岁之前完全失明。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔·贝尼耶（以下简称让-米歇尔）：实际上，我们要讨论的不是要不要抛弃这些技术，而是我们应该全盘接受人类能力所及的一切事物吗？因发明全息摄影而获1971年诺贝尔物理学奖的物理学家丹尼斯·加博尔[5]说过：“所有在技术上能够被实现的，无论要为之付出怎样的道德成本，都值得被实现。”人们被这句名言体现的大胆张狂所震动，但那又有什么用呢？它被万能市场的追捧者奉为圭臬，这令人感到遗憾。他们坚信对技术目标的选择和对自然物种的筛选应遵循相同的机制。当然，如今我们试着让技术的实施符合伦理学要求，建立各种委员会来审查科技成果的可接受性，但是在实践过程中困难重重：不惜一切代价鼓励新事物的发展已经成了政治或者工业决策者的不二信条。

洛朗：就这一点而言，我完全不同意你的看法，因为我是拥护创新文化的。我们之所以在未来会走得更远，是因为我们有这个能力。今后，修复人和增强人之间将不再有明显的界限。要是2080年的时候，人造视网膜会让盲人拥有比一般人更好的视力，我们会因此把想要植入视网膜的盲人送进监狱吗？答案当然是否定的！我们的医学将在未来数十年内由修复转变为增强。不要忘记，接种过疫苗的人类其实已经被增强过了！

让-米歇尔：我想就增强医学的概念再说几句。在我看来，唯有卢梭提出的关于人的定义是无可辩驳的：人是可完善的生物。换言之，人注定要不断进行自我完善，因为人类生来就是不完美的。人类的幼态延续现象[6]迫使他摆脱动物所特有的因过早成熟而陷入发育完全的停滞状态，这是动物从生到死一直具备的特点。

洛朗：卢梭的定义已经过时了：得益于生物技术的进步，动物也可以被改良。近期的研究拉近了我们与皮埃尔·布尔[7]笔下的《人猿星球》（1963年）的距离。科学家们进行了三项实验，其中最后一项实验于2015年2月19日在《当代生物学》杂志上发表。实验表明，用人类染色体片段来修改小鼠的DNA或者给它们注入人脑细胞，可以提高小鼠的智力。这些结果令人震惊。我们要如何阻止碧姬·芭铎[8]的信徒去定制一只更加聪明、更加善解人意、更加“人性化”的狗呢？人们对于提升动物认知能力的要求总是显得很宽容。这将成为社会需要面对的一种既成事

实，正如我们现在面对海外代孕母亲为同性伴侣所生的孩子一样。要以怎样的道德名义去禁止黑猩猩变得更聪明呢？尽管重视动物的尊严和尊重动物的观念越来越普及，但当它们的智商接近于当下人类的智商时，我们又该把它们这些动物视作什么呢？

让-米歇尔：你所说的很好地证明了对所有物种进行“改良”已经成为一种顽念。可是这种“改良”长期以来一直被前现代社会所拒绝，因为那时的人们更愿意遵从传统或是尊重超验。但我要将这种态度与复古主义或者保守主义区分开。我们是现代的，因为我们一直相信明天能够并且应该比昨天更好。从这个意义上说，我们对技术的迷恋是很自然的，并且我还要挑战卢德分子[9]和衰退主义者，我站在他们的对立面。阿米什人[10]和耶和华见证人会[11]的理念是一种经不起论证的民间传说。只是，“物种的改良”这个短语背负着另一个在历史上不甚光彩的名字：优生学。

洛朗：我们已经坐在优生学的滑梯上了，尽管我们并未意识到。唐氏综合征[12]正从我们眼前消失：97%的染色体异常患儿会在孕育过程中“享受到”医学终止妊娠。几乎没有父母能够抵挡住“消灭”这种智力残疾的社会压力，而我也并不反对这一集体决定。不过，基因技术迄今为止只能发现少量病症。但是对胎儿进行完整的DNA测序，即验明30亿个构成基因身份的化学信息，会从根本上改变这种情况。今后，只需对准妈妈进行简单的抽血化验，就可以对胚胎进行完整的基因组诊断：不再需要使用羊水穿刺术来提取羊水。普及产前诊断最后的障碍之一，即羊水穿刺术造成的0.5%到1%的流产风险，消失了！强大的算法可以区分胎儿和准妈妈的基因序列。鉴于DNA测序成本的骤降——在十年内降至原来的三百万分之一，这项技术有望在2025年之前得到普及。数千种疾病可以在孕期被系统地检测到，还不会使胎儿或准妈妈处于危险之中。尽管唐氏综合征患者性情温和，拥有正常的寿命，且不会被病痛折磨，我们还是在三十年里几乎根除了唐氏综合征。那么我们今后为何要用不同的方式对待其他病症呢？从政治上讲，无论胚胎结构如何，出于个人原因的堕胎都应当是自由的。既然因胎儿智力障碍（例如唐氏综合征）而堕胎是合法的，是被社会所接受的，是被当局所鼓励的，那么又该如何阻止父母们去偏爱“漂亮而天赋平平的孩子”呢？我们很快就可以提供给父母一个定制孩子的梦想：如果说产前诊断使“消除最坏”——消灭发育畸形的胚胎——成为可能，那么在植入子宫之前对胚胎进行诊断就意味着“选择最佳”，即对体外受精获得的胚胎进行分选。一旦体外受精的最后一点副作用得到控制，父母必定非常愿意使用这种方式。何况，从道德的角度上讲，清除试管里的胚胎比堕去腹中的胎儿更容易被接受。优生学的回归是一个未被察觉的政治炸弹，我对此深感担忧。

让-米歇尔：我们能够讨论的正是这个，我们都是“现代人”，或多或少会受到技术的影响。我们是否应该接受这种对“改良”的痴迷，甚至完全认同超人类主义者提出的“增强”理论？炼金术士和幻想家们一直抱有改造人类的梦想，让·罗斯丹[13]对用生物学实现这个梦想的前景充满激情；雷·库兹韦尔[14]则满怀欣喜地宣告，我们很快就会迎来一种能使我

们摆脱自我、摆脱我们自身微小的可完善性的后人类。让·罗斯丹的热情和雷·库兹韦尔的欣喜之间有何区别呢？超人类主义者能在生物学家的著作《超人的界限》中读到什么呢？生物学家又会从超人类主义者在《人类2.0：改变的圣经》中提出的预言里得到何种收获呢？

罗斯丹和库兹韦尔

在《超人的界限》（1962年）中，法国生物学家让·罗斯丹解释了为什么“改造人类——这个人类历史上最大胆的赌局，是一个比我们想象得更早到来的变化”。在 《人类2.0：改变的圣经》（2005年）中，美国未来学家雷·库兹韦尔满怀热情地描绘了生物技术、机器人技术和人工智能三者融合所产生的“技术奇点”。这两本书对技术力量怀有同样的信心，但实质上又有很大的区别：例如，罗斯丹始终关注科学研究成果的共享，而库兹韦尔表达了一种近乎侵略性的个人主义。事实上，双方所谈论的并不是一回事：前者的优生观离不开对事实和协调的关注，而后者的优生观只专注于效率和断裂。

让-米歇尔·贝尼耶

洛朗：你提到了圣经。然而，新的智能生物或者智能电子物体的出现会引发宗教后果：来自美国佛罗里达州的克里斯朵夫·J. 贝内克，是一位捍卫某种基督教超人类主义的牧师。以他为代表的一些神学家希望能给那些愿意接受洗礼的智能机器一个参加受洗仪式的机会。纳米技术、生物技术、信息技术和认知科学的融合提出了事关人类未来的新问题。21世纪的长河注定无法风平浪静。

让-米歇尔：确实如此。为了应对这波澜起伏，我重申我对把人类基因组转化为技术的积极态度，但是我也要求保留人类所特有的象征性维度。在古人类学家和哲学家眼中，正是技术（工具）和语言（言语）使人类，且仅使人类成为“拥有历史”的物种。我说得很明白：技术和语言。柏拉图在其对话录《普罗泰戈拉篇》[15]中也强调了这一点。他在回忆普罗米修斯的神话时提出：如果人类只把火和对技艺的了解作为生存所需，那么他们就无法生存。人类社会本就是反常和混乱的，受到自私和竞争的破坏，最终会展示出不适宜生存的一面。对此已有预感的宙斯便让赫尔墨斯赋予人类政治艺术，也就是一种用于辩论、评议和确定技术发展方向的语言，以创造一个能够保障人类福祉的和谐社会。我的立场并不意味着我是那类迟钝而恐惧科技发展的人，只是在如今这样一个人人热爱数字和计算的环境里，我的观点显得不合时宜。数据与理性思考的对立象征着科学技术在朝着一个排斥文化语言，只竭力保留必要的信号和编码的方向发展。我所坚称的立场至少还能摆脱生物保守主义与技术进步主义对峙的抽象。

洛朗：但是这种对峙的的确确是存在的！法国人是极端的生物保守

主义者：只有13%的法国人对利用胚胎干预提高儿童智商的方法持积极的态度。而在其他一些国家，支持这个方法的大有人在。

支持提高儿童智商的国家，在技术能力达标的情况下，能在知识社会占据巨大的地缘政治优势。牛津大学的哲学家尼克·博斯特罗姆[16]认为，在基因测序之后对胚胎进行筛选，能使一个国家的人口智商在几十年内提高60分。若再对胚胎进行基因编辑，我们还能得到更加惊人的增长。推崇优生学的国家很快就会成为全球的支配者！

让-米歇尔：我完全不能理解这种对智商的迷恋，对我来说，这仿佛是另一个时代的事情。它所蕴含的智力观念太狭隘了，只有陈腐守旧的人才会对此表示支持。在我看来，合理的人种改良并不是像你所描述的那样去提升个体的表现和才能。只有想要将人类变成动物或机器，才会用标准和尺度去衡量人类，或是将之简化为代谢和算法，后者正是数字文化及其帮凶GAFA：谷歌（Google）、苹果（Apple）、脸书（Facebook）和亚马逊（Amazon）所乐见的。

洛朗：但是不管你愿不愿意，这个GAFA正在描绘未来人类的轮廓，甚至改变人类的定义。

让-米歇尔：你肯定能猜到我是反对的，而讨论其原因正是本书的目的所在。

2 人类应该改变生殖方式吗

《圣经》决定了女人必须承受分娩痛苦的命运。于是几千年来，她们一直忍受着这种痛苦。但这是一种宿命吗？技术的进步让我们可以设想真正的人造子宫，以实现未来人类的体外孕育。

洛朗：让我们从一个事实谈起。我们人类已经改变了自己的生殖模式。计划生育引发了女性身份和家庭结构的革命。我们将加快这一变革，因为大部分的父母都渴望完美的孩子，也因为社会鼓励降低生产风险。技术性生育成为一种必要：没有安全保障和麻醉的家中分娩，如今看来是愚蠢荒诞的，但这在20世纪30年代是一种常态。挑选胚胎，淘汰不合格的胚胎，将成为理性妊娠的必经步骤。

让-米歇尔：所有这些的前景，实际上就是体外发育，也就是在母亲的体外完成胚胎的孕育。这个想法直到近来似乎都与阿道司·赫胥黎在《美丽新世界》里表达的反乌托邦思想不谋而合。但是这种体外发育已经用在了羊的身上，几十年之后可以对人类进行实验。生物学家兼哲学家亨利·阿特朗[17]预计，人造子宫将在2030年成为一种常态，它可以把女性从怀孕和分娩的痛苦中解救出来。

洛朗：我很高兴你能提到亨利·阿特朗，在我看来，他是研究该问题最为重要的专家之一。阿特朗认为，早产儿的暖箱与人造子宫之间没有根本区别。这一点很重要，我们的社会将因此不得不给予同性恋者更多的权利。有关同性婚姻的辩论一度非常激烈，不过现已基本趋于平淡。几十年来，同性恋者得到了认同和保护。如今，在同性婚姻合法化[18]之后，他们以平等的名义要求法律做出更多的调整：领养孩子的权利，使用医疗辅助技术生育和求助代孕母亲的权利。未来我们是否要赋予同性恋者繁衍后代的权利？我认为是的。目前，法国的男同性恋者会去美国或者亚洲进行这些操作，因为那里的试管婴儿和代孕母亲的市场比较成熟。他们在网上根据自己的需要购买一颗卵子，再租用一个可以使用九个月的子宫。这些网站特别留存了有关卵子捐献者的身体特征和智商的信息。于是，他们带着一个孩子回国。在根据法国法律对孩子的公民身份进行登记并完成一系列繁杂的手续之后，当局也就不再说什么了。然而，这个孩子只是两位家长其中一方的生命结晶，另一方不免会感到沮丧：女同性恋伴侣需要使用其中一位的卵子和子宫，以及来自第三方的精子；男同性恋伴侣则需要使用其中一人的精子和一个女人的卵子。

“赛博格”[19]和女权主义

提起“赛博格”，我们能谈论的内容有很多，但都是围绕同一个执念打转：它可以使我们超越一切长期缠扰人类的对立。事实上，赛博格将一切对立合为一体，以摆脱所有的选择取舍（例如生命和物质，男性和女性，自主意识和自发倾向……）。通过超越这些对立，赛博格使人类获得解放。身体的惰性抑或天然存在的对立带来的限制导致了人类的被动性，而赛博格则挣脱了这种被动。因此，我们可以理解这种人造生物所具有的魅力以及与之相关的迷思：它们在结束两个极端之间紧张关系的同时，也会成为人类历史的终结者。在我看来，这解释了热衷于赛博格的美国女权主义者们的作品，比如堂娜·哈拉维[20]在其作品《赛博格宣言》（2007年）中，表达了人类的解放必将经历以性别差异为基础的二元范畴的解构。

让-米歇尔·贝尼耶

让-米歇尔：你我都知道，一些心理学家对这些社会变化提出异议，理由是同性恋者收养的儿童可能会产生心理障碍，因为他们与孩子之间没有血亲关系，无法建立亲子联系。

洛朗：这个现在听起来似乎很有道理，但是今后从生物学的角度来说就不对了。技术能使同性恋伴侣的孩子携带家长双方的基因，就像异性恋伴侣生育的孩子一样。IPS诱导多能干细胞技术（Induced Pluripotent Stem Cells，目前我们可以通过对人体成熟的皮肤细胞进行重组来获得任意类型的细胞）就可以利用成纤维细胞[21]及一些皮下细胞制造精子和卵子。它的发明人山中伸弥因此获得了2012年的诺贝尔生理学或医学奖。我们现在已经可以用两只公鼠的体细胞制造幼鼠，而这项技术应用于人类只是一个时间问题。一些同性恋组织会为此积极活动，以缩短这个时间。该技术目前只有一个限制，那便是女同性恋者通过这项技术得到的孩子只能是女孩。

让-米歇尔：超人类主义者对你刚刚提到的有关IPS细胞技术的最新进展也同样非常了解，这能让他们维系对永生不死的幻想：假设我们可以将体细胞恢复到刚刚从生殖细胞中分化出时的状态，我们不仅可以考虑用不断生产出的新器官去代替那些已经到年限的旧器官，还可以设想通过抑制导致细胞变性的端粒酶[22]（一种缩短染色体的酶）机制来阻止细胞的老化。对长寿乃至永生的痴迷，无论在何种情况下都不利于有性生殖的发展，因为有性生殖需要的是多样化而不是重复，因而它需要更新，需要用死亡去肯定生命。但是渴望永生的超人类主义者并不热爱生命，他们已经准备好消灭有性生殖。这不表示他们一定会去考虑戒除自己的性欲，他们会主动把性欲降格为色情的无意识行为，就像米歇尔·维勒贝克[23]在其作品中建议的那样。再进一步来看，对他们而言，与赛博性爱（cybersexualité）联系在一起的色情象征着强迫性重复[24]，它所带来的小死亡（性高潮）可以让他们避免大死亡（真正的死亡）。

洛朗：改变人类繁殖方式还有另一个原因。对每一代人来说，组成染色体的30亿个DNA碱基对里，会有1 000个化学碱基在精子和卵子的产生过程中被细胞机器错误复制。这些复制的错误可能会导致变化的产生。要是错误率为零，物种就不会进化，那么我们应该还是细菌！自然选择消除了不良突变：只要携带发生不良突变的基因组的物主无法达到生育年龄，这些基因组就不会被传播。然而，我们思考一下还会发现，达尔文的进化论亦为自身的崩溃创造了条件：人类通过将自身组织成一个团结的人类社会，大大降低了自然选择的严苛性。婴幼儿死亡率的下降就是这种严苛程度降低的证明。17世纪时，被筛选掉的儿童占比达到30%，而现在仅约为0.3%……很多如今能幸存下来的孩子在过去生存条件更为苛刻的年代里是无法活到生育年龄的。筛选机制也终将自我消亡，尤其是认知能力较差的个体不再会被淘汰，这是非常幸运的。尽管医学、文化和教育将在一定时间内延缓人种素质的衰退，但要是没有自然选择，我们的基因遗产还是注定会不断恶化。这是否意味着我们的后代在未来的几百年或者几千年里会变得愚钝低能？当然不会！生物技术会弥补这些有害的演化。

基因的衰落

科学杂志《细胞》刊登过一篇轰动一时的文章。作者在文章中证明，由于人类DNA中负责调节大脑构造的区域里累积了不利的突变，人类的智力水平将会大幅降低。事实上，这里有两个相互矛盾的趋势在起作用。第一个趋势是积极的：人类的交配行为促成基因变异体的混合，这会带来新的生物性状。实际上，人类这个物种在75 000年前彼此分离，成为不同的种群，各自都经历了基因变异。这些种群分支早在现代交通工具出现之前就已经彼此分离，而目前的这种基因变异体的混合确保了不同分支之间的基因杂合。但是有害的基因变异体也在人类的基因组中累积，这已经可以被察觉到了：2012年11月底发表在《自然》杂志上的一项研究表明，人类中有80%的不良遗传变异仅出现在距今五千到一万年的时间里。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：你说到了自然选择。我要提醒你的是，性和死亡是密切相关的，超人类主义者关于永生的幻想其实是要抑制有性生殖。医生和人类学家雅克·吕费耶[25]在自己的作品《性与死》（1986年）中提到，自然选择为复杂的生物有机体选择了有性生殖，它们必须具备多样性才能适应环境并不断自我更新。于是，自然选择让死亡伴其左右。“我们是性与死的孩子。”作者写道。从自然选择的角度而言，死亡有一个优势：“有性生殖不断创造具有原始基因物质的新个体，但是只有当他们的祖先给他们留出位置，并且有朝一日他们也要让位于自己的后代，这些新个体才能去交配，去散播他们的基因组合（尤其是那些适应力最好的物种）。”以分裂生殖为繁衍方式的低等生物几乎是不死的，它们通过分

裂和再生从自身的一小部分里进行繁衍。只要环境条件稳定，它们就不会死。不过，由于无法变化，它们也就无从享受使人类得以诞生和发展壮大的进化过程。

洛朗：在我看来，重新思考人类繁衍方式的雄心并不荒唐。对人类基因组越来越详细的了解以及对之进行编辑可以减轻人类未来世代的遗传负担。因此，尽管有各种质疑，国家伦理咨询委员会还是在2014年接受了针对胎儿的基因测序。更令人不安的是，对婴儿的基因改造会逐渐成为一种必要。卵子工程是基因改造过程中至关重要的环节。自2009年开始，研究人员就在灵长类动物身上进行了干细胞取代线粒体的实验，这让我们萌生了对人类进行同样实验的想法。线粒体是在大约10亿年前进入有核细胞的细菌，并成了专门制造能量的结构。它们拥有自己的DNA，可以变异。因此，一些人体内的细胞是高质量的“能量工厂”，而另一些人的“能量工厂”却质量不佳，这就会导致很多类型的疾病（进行性肌萎缩、神经退行性疾病、耳聋、失明以及某些形式的糖尿病等）。我们希望可以将替代线粒体的技术应用在人类身上。英国生物伦理学委员会允许将这一技术用于剔除携带有害基因的线粒体，用其他女性的线粒体进行替换即可实现。实际上，线粒体总是来自母体，位于卵子的细胞质中，而母体的染色体则位于卵子的细胞核中。为了确保未来的新生儿拥有“良好的”线粒体，今后，我们可以在体外受精的过程中，使用一枚携带良好线粒体的女人的卵子，将这枚卵子的细胞核更换为携带不良线粒体的“生母”的细胞核，然后再注入父亲的精子形成胚胎。英国生物伦理学委员会近期批准了三个家长（两个母亲和一个父亲）共同孕育婴儿的做法。这种治疗方法会影响被孕育的孩子，如果这个孩子是女孩，这还将影响到她的后代，因为精子的线粒体在受精过程中被破坏了。

让-米歇尔：你所提到的前景，是借助克隆技术进行人类繁衍。把这项技术当作对人类物种的犯罪而废除和谴责它，是没有任何实际用处的。它越来越不会威胁到那些毫不犹豫宣传自己正在为制造超人类而不懈努力的人：制造生命，尤其是在破解基因密码后对选定的基因组进行复制。我之前提过，我们反复解释有性生殖是一种筛选手段，它在保证大部分动物物种存活的同时，让它们必须面临死亡。在超人类主义者看来，生殖机制本身远比妊娠的各种形式更适合被改造。事实上，NBIC技术融合计划所涉及的生物技术坚定地要抑制有性生殖，寻求使用程序化的生产，也就是克隆技术，来代替生命的诞生。对于超人类主义一派来说，出生具有一定的偶然性，因此它必然带有弱点，而这个弱点是人类本可以克服的。电影《千钧一发》[26]可以被看作技术化生育可取性的一个论据：如果技术必须使我们完美，它就得消除由两个配子随机配对而孕育出的孩子所具有的不确定性部分。

洛朗：完全同意！我们将在生物越界方面迈上一级新台阶：在这之前人们认为，就算可以改变个体的基因，那也不能使之在后代中传播。但事实上，让每一代人都去进行基因治疗是不合理的。父母希望可以永久根除后代患有进行性肌萎缩和亨廷顿病的风险。这里还有一点无法回避：要是我们的曾孙们忘记给自己的后代进行治疗，那么疾病将再次发

作！此外，这种新型基因疗法将再次引发关于同性恋者生育的争论。例如，这项技术可以直接通过两个卵子而不使用精子就得到胚胎，这正是女同性恋群体的强烈愿望。生物学的发展是如此之快，以至于社会秩序将被大量生物技术的越界打乱。我并不想让你担心，但遗传学家正要开启一个更加令人不安的阶段，这将彻底重新定义人类。乔治·丘奇[27]来自哈佛大学，是一位杰出的、敢于打破传统的遗传学家，深受超人类主义文化影响。2016年6月2日，他与24位研究人员及工业家一起，在《科学》杂志上详细介绍了“人类基因组编写计划”项目（Human Genome Project Write）。这些合成生物学的领军者想要在十年内创造出一种全新的人类基因组，用来生成人类细胞。这项技术还可以用于制造胚胎，从而创造出没有父母的孩子。虽然这还有些遥不可及，却已经让许多科学家和神学家震惊不已。这里涉及的不再是“定制婴儿”，而是创造一个全新的人类。

3　技术能否修复万物

疾病和残疾令人难以忍受，这一点毋庸置疑。但是人类的身体可以像机器一样被完全修理好吗？先进的技术使之成为可能。但是，这是否会让我们失去使人真正为人的具有意义和象征性的维度呢？

让-米歇尔：1946年，世界卫生组织给出了“健康”的定义，从那以后，（个人和集体的）良好状态[28]成了人类的执念。以前治疗病人的医生成了负责人类良好状态的技师。健康不再是“器官的沉默”，而是这种状态的自我表现（从广义上讲，它就是幸福的同义词）。医生的职能扩大了，现在他必须维持、产出和提升人类的性能，以展示人类的活力。他要预防会给人体器官带来损害的问题，并将之修复。因为疾病只不过是一种身体故障，除了会打断人体的某种代谢功能，再没什么特殊意义。一个好医生应该做的就是重启机器，要是还能利用这种疾病推动机器发展，那就更好了。想要做到这一点，工具就起着决定性的作用：生物技术、神经科学、纳米医学和成像技术会有效地取代旧时医生的听诊、触诊和临床问诊。

一旦我们接受了关于生命的机械论概念和修复这个词汇，我们就必须接受技术在健康领域（良好状态）是无所不能的。因此我们还必须接受增强人这件事，目前增强人还是联网医疗可选择的一个前景。这种改变了对疾病和患者认知的新情况所体现的是对标志着人类的特殊性，避免人类退化成一种简单生命体的象征性部分的排斥。这个象征性部分蕴含在人类对符号的利用中，这些符号使人与人之间得以进行对话，使人类能够摆脱束缚动物的自然直接性，逃脱人类自己创造的机制。人类是符号的生物，不像动物和机器人只是简单的信号的载体。对人类来说，疾病有一个意义：它反映了一种在世存在[29]的方式，一种承认或者否认人类内在的脆弱性的方式，一种拥抱新的可能性或是让我们反思自我的方式……疾病具有象征意义，我们甚至知道它会迫使我们与自己的精神生活妥协，并用一种令人意想不到的方式对此加以引导。

拒绝仅仅从器官功能方面着手医治人类疾病，显然并不等同于承认只有心因性疾病。总而言之，只有执着于数字，只能以二元思维方式思考问题的人才会这么想：器官或是心因，非彼即此！我知道精神分析师格罗德克[30]在轻微的感冒中看到了歇斯底里的症状，但是我同样知道有一些维护人类健康的技术人员无法想象在治疗疾病的过程中心理因素所占据的部分。如何避免以一种抽象的方式对立看待需要对话交流的护理和仅需要工具的修复，需要时间来完成的人际关系与要求及时反应作

用的治疗记录？必须等到病人进入临终关怀阶段才去权衡技术医学可能已经给病人造成的损害，这种行为是非常荒谬的。于是人们会对病人解释，在这里人们不再治疗他的癌症，他不用再接受化疗，但是他可以得到良好的照顾，仿佛只有在技术失败时才能有这样的体会，仿佛只有在确保了“生命的预后”，以及对身体机器无计可施时才能出现人际关系的回归。这种专门用来治疗疾病的技术手段无法治愈病人的孤独感。因此，应该保持一个共识：人并不是一种只需苟活于世的生命。

洛朗：你提到了象征和符号。尽管如此，人类很早以前就开始进行技术操作了。2005年，伊莎贝尔·迪诺尔[31]接受了全球首次面部移植手术。2013年9月，何塞-阿兰·萨赫勒教授的团队为一位失明患者植入人工视网膜“PixiumVision”，使之恢复了部分视力。2014年5月，美国政府批准了把仿生手臂直接与截肢者的神经相连的移植手术。同年9月，一位36岁的瑞典女性诞下一名男婴：天生没有子宫的她接受了来自一位61岁且绝经多年的朋友的子宫移植。

让-米歇尔：如你所说，把“良好状态”的产生完全托付给技术，会让我们感受到人性正从我们自身逃逸：当我们修复一个出了故障的身体器官时，我们又该把内心生活变成什么呢？如果医生再也不花时间倾听病人对痛苦的描述，如果他只关心通过机器收集并辨读的数据，这就说明他相信自己的工作不再是一门艺术，他只能让位于数据的计算和管理（著名的大数据）。从今以后，我们希望技术掌握最终的话语权，也就是技术将会终结医生和病人之间的对话。在那些受过数字技术培训的医生看来，精神分析和一般心理学方法被普遍排除在诊疗手段之外是具有深远意义的：这不仅是对器质性疾病会给一位非常态病人造成的精神影响置之不理，也是对一切不符合计算逻辑、不符合客观指标评估的内容嗤之以鼻。只有当人类被局限在技术之中时，技术自身才能快速发展，但是人类对技术的过度使用为疑病症[32]的广泛传播打开了大门。

洛朗：但是无论你愿意与否，技术还是会发展的。NBIC的技术革新层出不穷。这些革新越来越惊人甚至会越界，但是社会对此却表现出越来越高的接受度：人类已经坐上了越界的滑梯。我们在毫无觉察的情况下变成了超人类，也就是被使用技术手段修改过的男人和女人。从现在起到2050年，生物技术带来的更为惊人的冲击将震撼我们的社会：干细胞再生器官、基因疗法、大脑移植、抗衰老技术、基因定制婴儿、通过皮肤细胞制造卵子……

让-米歇尔：当然，我们会生活，或者应该说是存活更长时间。技术主要是修复性的，并且应当始终如此：所有的植入假体都应该是先验为合乎期望的，只要这个假体是用来代替一个从未存在或者不再存在的器官（先天器官缺失的人和后天残疾的人都可以享受），或者用来恢复一种近乎衰竭的感觉或功能。这里有个例子值得一提：有些聋人或者被截肢的人拒绝使用辅助设备，理由是对这些设备的使用是在强制他们遵守一种完全陌生的行为标准（需要佩戴人工耳蜗，而不是在聋人社群中用手语交流，或是需要使用这种通常会造成疼痛的义肢，而不是动员身体

创造出可以适应的动作……）。这可能是技术在关乎健康的使命中值得商榷的一个部分：辩称技术可以拯救某些人的生命，以期把自己的形式强加给所有人，这是技术通过忽视个体差异，无视自己创造的幸福条件需要因人而异，特别是无视当中最具人性的部分来实现的。

生物保守主义者vs超人类主义者

我们中的大多数人都将接受这种生物革命，让我们老得慢一点，痛苦少一点，死得晚一点！“宁成为超人类也不愿死”成了我们的格言。超人类主义是一个源自硅谷的造物主般的意识形态。随着NBIC技术的兴起，决心对抗衰老和死亡的超人类主义正在崛起。这是否意味着医疗进步不会遭到政治反对？事实上，政治棋盘正以新的轴心进行布局。左与右的分野在21世纪似乎会成为过去。未来，生物保守主义者和超人类主义者之间的对立可能构成生物政治的空间。在新的轴心里，会有意外的联合出现。因此，若泽·博韦[33]到目前为止还是一个极“左”的活动家，但在新的生物政治秩序中，他与原教旨主义天主教徒一样，是极端生物保守主义者。他坚决反对为不孕不育的异性恋夫妻或者同性恋伴侣进行人工授精，也不赞同使用基因疗法治疗遗传性疾病。

2014年5月1日，他在天主教频道KTO上宣传：“我坚信一切操纵生命的行为都应该被打击，无论这是针对植物、动物还是人类生命的操纵。”若泽·博韦会比La Manif[34]的主席吕迪维纳·德·拉罗塞尔更保守吗？他会支持这些技术吗？NBIC会让政党产生内部的分裂。

洛朗·亚历山大

4　未来是赛博格的天下吗

生物学、信息技术和工程科学的融合催生了新技术，而这些新技术并不只满足于修复人类正在遭受痛苦的身体。它们想要改善和增强本就健康的身体。但是，一个身体与技术设备密不可分的新人类，其前景又会如何呢？

让-米歇尔：如果说赛博格是生物机体和具有自我调节能力的设备的组合，就像20世纪60年代的宇航员和他的传感器一样，那么可能我们都在逐渐成为“赛博格”。人与自动装置的结合在很早以前就已经实现了。由于机器自身的机制，它可以让人在不需思考的情况下运作起来。比如，佩戴心脏起搏器的人不必担心自己的心脏。

洛朗：关于这个主题，我要提醒你，世界上第一个赛博格，是一位患有终末期心脏衰竭的病人。2013年12月18日，嘉玛公司为他设计并植入了人造心脏，这在当时的法国社会颇受好评。你懂的！这说明把人与机器进行融合的新技术得到了很大的认可。

让-米歇尔：大众对于融合的态度或许是这样的，但是不要忘了，工具的使用者（使用外骨骼使自己可以走路的瘫痪患者，使用大脑刺激器控制自己颤抖的帕金森病患者）必须屈服于工具的设计，并且让自己的行为适应这些工具。这些工具是对身体的延伸，定义了一个必须与之妥协的外在。相反，外骨骼、假体和植入物所具有的控制性势必更有侵入性，这种控制甚至会要求佩戴者把它们当作身体的一部分，甚至与之融为一体。我们寄希望于可以在人体内循环的纳米机器人来检测肿瘤的形成，消除可能是肿瘤的物质，修复需要修补的DNA……多亏了机器的存在，这成了一个无所顾虑的梦想，标志着对技术的高度掌握。

洛朗：这个梦想甚至在硅谷也是令人不安的。贝宝（Paypal）、超级回路（Hyperloop）[35]、太阳城（SolarCity）[36]、特斯拉和太空探索技术公司（SpaceX）[37]的创始人埃隆·马斯克解释道：“人工智能的潜在危险性比核武器还高。”他预言人类将会成为人工智能的拉布拉多犬：从人工智能的角度看，人类中最具有共情能力的人会成为家养宠物。为了达到自动机器的高度，谷歌公司的一些领导者建议人类与人工智能进行混合：为了不被人工智能超越就要成为赛博格！为了避免（过于）劣于机器而成为像电影《黑客帝国》中的机器奴隶，增强技术将会是唯一能让人类保留一定自主性的方法。矛盾的是，让人类避免沦为机器附庸的终极武器也因而会成为人类自杀的帮凶：与人工智能进行融合以消灭

生物人类1.0。

增强人

对“增强”的技术追求与硅谷的乌托邦精神背道而驰。按照永远在追求增长的企业家们极具煽动性的口号，这种技术追求希望“创新优于一切”。这就是为什么我们会把美国人用的“enhancement（增强）”一词译为法语的“augmentation（提高）”，而不是“amélioration （改良）”。我们认为“改良”这个词用得并不确切，因为在超人类主义者看来，与改良相关的是动物的世界，在这个世界里可以清晰地区分生物和人类生命，生物的新陈代谢和对事物意义的渴望。德国哲学家彼得·斯劳特戴克[38]在他的作品《人类公园规则》（2000年）和《人类的驯化》（2000年）中描述人的“人类技术学”生产时，就已经理解了这一点。

让-米歇尔·贝尼耶

让-米歇尔：于我而言，赛博格之所以令人害怕，是因为它会伴随着自我失控。人们认为让机器负责治愈制约人类的疾病（瘫痪、残疾、失明等），可以使人类自己变得自主，人们很快也会发现，当我们被赛博格化了之后，就会依赖一个自主的力量（例如可以自我调节的假肢），并且再也离不开它了。与机器进行融合对人类来说始终是有害的。生物体在自身机能中保有不确定性，有着随机的部分，而与机器的融合会否定掉生物体的这一特性。赛博格要服从带给它技术辅助的程序设计。严格来说，它不再拥有自由。赛博格化必定要以安全为第一要义，为此它要求去除定义生命的偶然性。它所能展现的性能是潜在技术的更新，但与似乎能将之实现的人类的自由意志和行为冲动没有任何关系。这就是为什么我们要思考这样一个问题：对具有控制作用的设备的拥有，会在什么时候，以怎样的程度，将人类变为非人类？

洛朗：提到人类就会提到自由意志，对于生物学家来说，这带来了关于先天和后天问题的讨论。弄明白这个基本哲学问题对社会凝聚力的形成和人类共同价值观的创造是非常重要的，只有这样才能避免虚无主义的干扰。一方面，一些人认为基因对人的个性有着重要影响；另一方面，一些人认为是环境造就了人。其实，真相就在两者之间：某些基因变异会使个体具备某种特殊才能或某些认知能力，但是对生命的刺激会塑造个体，从而发展或者抑制这些能力。

生物保守主义者往往以某种假想的遗传决定论的论据为基础，试图阻止生物技术的腾飞。他们认为这些实践是对生命和人类物种的不敬。然而，对人类基因组的测序让我们得以超越这种简单的区分。我们从中了解到，在我们的DNA中，属于人类特有的基因是非常少的。而且动物的基因组和人类的基因组有诸多相似之处。于是我们可以得出这样的结论：尊重人类物种和不改变人类基因组几乎没有关系。人类基因组与黑

猩猩基因组之间的相似程度达到了98%。我们和实验室里的老鼠或者猪也是非常接近的。并不存在什么人类特有的基因可以把黑猩猩变成飞行员，把老鼠变成核物理学家，或是把猪变成大提琴手……

遗传学告诉我们，关于先天和后天的争论并没有真正的意义。也许在教学法和方法论的领域，对二者的区分是有用的，但二者其实是完全交织在一起的。基因表达的倾向体现为发展某一特征或罹患某种疾病的概率。但是大部分倾向只在特定环境中才能显现。所谓“环境”，既可以是生活的地点，也可以是生活方式（香烟、酒精、与化学产品接触等）、文化、教育、社会地位……

先天、后天和意识形态

需要强调的是一部分具有正统思想观念的精英继承着荒谬的虚无主义。从蒲鲁东[39]到马克思，社会主义思想在很大程度上是建立在人类本质是中性的这个观点之上的，环境的影响作用是其根本特征，因此，它会以一种非常糟糕的眼光看待某种形式的生物决定论的有力回归。斯大林时期，几百位科学家因坚持认为人类的一部分是由生物学决定的而被送去了古拉格劳动收容所。关于“基因与社会学、遗传与环境、DNA与文化”的二元论式辩论的终结对于社会学家来说是一个很坏的消息！光用激情的演说来反对生物学已经远远不够了，他们还必须学习遗传学和表观遗传学。基因与环境之间存在着永恒的、复杂的和双向的相互作用，这些互动的存在是具有革命性意义的！在DNA和布尔迪厄[40]之间，有表观遗传学，以及一些唯基因论者反对的声音。现代生物学需要花时间与社会学进行结合，但是它已经到来，这比唯基因论者和基因否定者之间的争斗更令人满意。从此以后，社会学和遗传学可以互相充实。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：我想要补充的是，还有技术。当一个人把接收器和生物传感器、外部或者体内的假体、皮下或者脑内的植入物接纳为自己身体的一部分，他是否仍应被看作一个具有自由意志的人？这就是何塞·帕迪里亚[41]在电影《机械战警》（2014年）中描述的情况。与之相比，凯文·沃里克[42]对成为“世界上第一个赛博格”的追求就显得无足轻重了：这位控制论工程师在自己的胳膊中植入了电子芯片，这样他就可以在不做思考的情况下通过电磁波对周围环境进行控制。在此方面，格勒诺布尔的Clinatec生物医学研究中心对四肢瘫痪的病人进行了技术实验，这些病人甚至不用通过意识或者意向性就能将突触电流转化为感觉运动指令，他们是赛博格化竞赛中的有力竞争者。实际上，为了使赛博格能够存在，有一点非常重要，那便是人工制品不应成为只是用来延伸身体部分的简单工具，而应具有实现非自然活动的能力。这就是为什么赛博格是增强人的另一个名字。赛博格的形成不是通过技术辅助把人进行修复

或者延伸，而是通过基因工程给人加入了一些人类自身并不具备的感官能力或技能（例如蝙蝠的听力，鲨鱼对电波的敏感性）。成为赛博格，就是要以一切方式突破人类的形式，加入一些（仿生的或是纯机械的）人工制品，以完成人类本身无法实现的壮举。

5　我们可以和机器人做爱吗

更加令人不安的是：有朝一日，机器可以满足人类更加私密的需求，例如情感和性欲。虚拟现实似乎和真正的现实别无二致，但是最终我们想要的是谁？一个被机器赋形的幻想生物，还是人类投射在机器身上的幻象？

让-米歇尔：关于能否与机器人发生性关系的问题当然需要一个积极的答案。严格来说，无论用什么方法，只要能消除性感带的紧张感，性爱就能成为可能（机体组织是所有性感带的载体：生殖黏膜、肠黏膜、肛门黏膜……）。因此，人类做爱的方式五花八门，更重要的是，还可以利用机器人的机械装置。为什么要特别提出赛博性爱呢？是因为它比充气娃娃的使用感更好吗？虽然在很大程度上是这样没错，但这还不是全部的原因。

洛朗：很多人在一生中手淫的次数比与其他人发生性关系的次数还多！对这些人而言，与机器人发生虚拟的关系比简单的手淫更好。为了普及与机器人的性爱，机器人必须变得聪明，这得要个几十年。否则，它只会沦为一个复杂的性玩具。

弗洛伊德的性学说

性是多样的，尤其是如果我们将它定义为对一种冲动的满足。据其定义，这种冲动会使身体一直处于一种疼痛的紧张状态。就像我们从弗洛伊德那里知道的一样，由于儿童尚不能使用生殖器官，他们就无法采取性交这种在文明社会看来“正常的”手段来排解自己的紧张状态，这会导致儿童的各种变态。因此，弗洛伊德让我们有理由将性与生殖分离开来，这在一个不受清教主义影响的现代社会是显而易见的。他所定义的常态只包含一种观点，那就是性行为凝聚了性冲动的来源和性器官的满足，从这一点上讲，无论是同性恋还是异性恋，都身处大自然开辟的道路上。最终，变态是一种心理的返古，是人在成年时期对力比多[43]各种表现的怀念——这种返古会遭到社会的谴责，并且可能是危险的。

让-米歇尔·贝尼耶

让-米歇尔：即便机器人还不具备人的样貌，它也是一种与众不同的机器。它可以运动，给人一种可以独立自主的印象。因此，它唤醒了人类对万物有灵的想象。人们觉得它对这个世界有着自己的观点，因而它可以与人类进行对话。至少它可以像宠物一样倾听和理解人类的情感和思想，当它具有人的外形时，人类则更坚信它们能够理解和倾听。于是机器人几乎是一种普通动物，一种非常接近于我们的存在，而我们自己也同样被认作“普通动物”。作为一个可以参与对话的存在，机器人没有理由不参与性行为，正如动物本身一样。如果机器人被赋予这样的功能，使它可以接受和释放性冲动，它就会成为一个理想的性伴侣。我们常会听到这样的说法：机器人能很好地代替性伴侣，因为性伴侣时常会拒绝你（啊，我头痛！亲爱的，今天晚上不行！），无法满足你所有的需要，或是羞于表达自己的快感。为此我们可以奢侈地购买一个可以与之大胆露骨地谈情说爱的机器（就像于2013年公映的由斯派克·琼斯[44]执导的电影《她》中的那样），并且还不会产生内疚感，因为内疚感会降低变态者的快感。长期以来作为消费对象、受色情作品市场左右的性欲将会得到充分的释放，因为人与人之间已经很难产生性冲动了，试图解决频繁浏览色情网站对青年人造成的影响的性瘾学家也注意到了这一点。

洛朗：你提到了《她》这部电影，这非常贴切。真正的赛博性爱会涉及机器人技术、人工智能、神经科学和虚拟现实，就像脸书推出的Oculus头戴设备（可以让人看到虚拟现实）。再过几十年，人类真的有可能爱上像电影《她》中一样的机器人。

让-米歇尔：这部电影提到的赛博性爱非常明显地体现了我们之前所说的去象征化，与之相伴的是机器霸权的崛起，这将会损害人类自身。这种性爱使欲望退化为需求。欲望，是性欲的原貌，它使男男女女进入相爱状态，相互靠近，彼此吸引，它是无限冒险中的一部分（所有的欲望都无限渴求着欲望）。需求，意味着性欲被存在的缺失感取代，人类在这种感觉的驱使下彼此靠近，只叫嚣着需要被满足（所有的需求在得到满足时就会消失，之后会再次出现，就像动物一样，这种需求周而复始）。面对这种动物化和去符号化（需求取代欲望），即便有可能对机器人进行完善，使之具有模拟人类陷入爱情的状态和能力，人们也会持反对意见。机器人将远不只是一台用于手淫的机器，人类会和它一起进入一个可以唤醒人类情感双重性的恐怖谷[45]。显然，这一切都是可以想象的，并且已经引起了消沉的超人类主义者的兴趣，不管怎样，他们不用再把生物性冲动看得那么重要，因为他们梦想与机器的融合将会压抑这些冲动。如果未来属于非生物，性欲可能会通过机器人得到宣泄，但是它会和死亡以相同的方式消失，因为它与死亡是不可分割的。如果后人类的乌托邦认为永生是可能的，那么它只能用性爱的各种形式将性欲终结。

洛朗：法国共产党的伟大领袖珍妮特·维梅尔施-索雷兹曾宣布反对避孕药：“从何时起，工作的女性要求拥有资产阶级恶习的权利？从来没有！”我感觉这件事好像已经很久远了。经验证明，无论我们提出的伦理

问题是什么，从“禁止”到“容忍”再到“允许”甚至“强制”的速度都主要取决于科学发展的速度。而这个经验对性爱同样适用。

6　长生不老真的让人向往吗

这可能是超人类主义者做出的各种许诺中最令人不安的一个：对死亡进行安乐死，活上一千年。谷歌也相信：通过对个体遗传数据进行分析，再加上再生医学的进步，完全有可能让人万寿无疆。但是这有什么好处呢？能带来什么乐趣呢？

洛朗：生物技术革命正加速蚕食着死亡，正在把一种不可能变为可能。死亡率的降低已经不是新鲜事了，人类的寿命已经增加了两倍多：1750年，法国人的平均寿命是25岁，现在已经增长到超过80岁。如今，这个数字还在以每年3个月的速度增长，也就是说，我们每长大一岁，只离死亡近了9个月！当然，有一堵自然的生物墙竖在那里：让娜·卡尔芒[46]达到的年龄（122岁5个月零14天）似乎是一个极限。要想跨过这堵墙就得借助NBIC的力量，用深刻的技术干预来改变我们人类的属性。纳米技术的革命性维度根植于这样一种事实：生命本身能在纳米（十亿分之一米）尺度上运转。生物学和纳米技术的融合把医生变成了生命的工程师，并且源源不断地一点一点赋予他们用于修改人类自然属性的巨大力量。从现在起到2035年，生命工程学（包括基因疗法、干细胞技术和人造器官）一定会给人体的健康系统带来巨大变革。今后，纳米医学、对端粒酶（一种防止染色体衰退的酶）的操纵（很有风险），以及对血清成分的修改都可能加速死亡的退却。

让-米歇尔：确实，公众对能用来实现长生不老的方法有了越来越多的了解：控制端粒酶机制可以防止衰老，使用IPS细胞技术可以按需制造和更换衰退的器官，将大脑中的内容下载到不会变质的材料上可以使意识永存……在超人类主义者的承诺排行榜上，这些可以使人类寿命永续的方法始终出现在最前列。我从中看到了属于我们这个时代的有力象征：我们已经如此轻蔑死亡，我们已经把它等同于一个医生可以修复的故障，以至于我们会提出一个与之对应的问题：长生不老，或者是无限期地活着，真的是我们所向往的吗？你不应该忽略这个问题。因此，我们发现事实上并不是人人都有长生不老的白日幻想。这些幻想已逼近想象的极限，甚至有时提及这些幻想会激起人们的拒绝（用以区分生物保守主义者和超人类主义者的典型反应）：“长生不老？算了吧，我可不想！”我常听到这样的回答。就算我们几乎都表示不希望所爱的人死去，但这并不意味着我们自己一定想不惜一切代价永远活下去，因为这件事的全部要义只有一个：存活。我们至少会问自己一个基础的问题：伴随长寿而来的会是使生命变得更令人向往的境况吗？什么样的人生才值得

无限存在？要是我能活到85岁，那当我65岁的时候，我一定想再活20年或30年吗？还有：我有必要讨厌死亡吗？

洛朗：第一个有望活到一千岁的人也许已经出生了。这听上去似乎很荒谬，像是来自一部拙劣的科幻小说或是某个宗派的观点。尽管如此，但这始终是硅谷的信念，尤其是谷歌领导层的信念：谷歌加利福尼亚公司的首席工程师、未来学家雷·库兹韦尔是超人类主义理念的先锋。这种理念，用他们自己的话说，旨在“对死亡进行安乐死”。一个出生于2016年的孩子到22世纪初的时候只有84岁，他可以享受各种在本世纪可以预见的和不可预见的生物技术创新。他可能已经拥有了更长的寿命，足以支撑他活到2150年并经历新一波生物技术创新的浪潮。如此这般，他就能逐渐活到一千岁。想要延长寿命的人类欲壑难填，然而大幅延长寿命所需付出的代价将是沉重的。

让-米歇尔：完全同意。我不想重复先贤们的陈旧观点：“探讨哲学就是学会面对死亡；宁可活得激烈也不要活得长久；应该学会以美丽的姿态谢幕……”我承认，在面对我们所爱之人的死亡时，我们难以坚持这些论点，但是当NBIC做出的承诺如你刚才所说的那种形式呈现“你们当中的一些人可以活到一千岁了”，相信反对意见是会非常多的。

如果我活到了一千岁而我周围的人只能活到一百五十岁，我该是多么孤独啊！与我同时代的人相继去世对于我来说是持续的痛苦。接下来，即使我活过了这种情感灾难，我也有极大的可能会被无聊感摧毁。我会像米歇尔·维勒贝克的小说《一个岛的可能性》[47]中的主人公一样，百无聊赖地将反复克隆生命的相同情节串在一起。所以，我会重新审视自己是必死之身的状况，并告诉自己这终究是一个特权：是希腊人认定的，与动物和神灵情况相反的特权。动物不知道自己会死，并且它们可以相信自己会生而不死，当它们成为这个物种的标本时，就又重新回到了自己的物种中，进入了生与死的无限循环。面对这种毫无活力的永生，有限的生命又有怎样的特权呢？它可以带给人自由感，而这种自由感可能隐藏于焦虑之中（因为时间的不确定性带来的偶然性会引起人的焦虑），但它也可能激发普通人战胜必死宿命的决心（完成卓越的作品，实现英雄的壮举或是审慎而体面地活着）。凭直觉我们知道，有尊严的生命以接受生命的结束为前提，而不是疯狂地为了活着而活着，别无他求。我们猜测，对无限寿命的承诺是要赋予我们一种动物化了的生命（无限延长你的新陈代谢）或是一种机器人化了的生命（把人类变成不锈金属），而不是一种有教益的生命（你可以阅读所有书籍，教育年轻人，建设理想的城市）。面对永生的幻想，我们明白了只有死亡才能赋予生命以人性的意义。有些人赞同用消灭死亡来实现一种抽象的永续，我们同情有这种荒谬想法的人。

洛朗：你说的是对永生的幻想。我认为这不是幻想而是一种真实的可能性。谷歌公司加入了对抗死亡的战斗，这使得永生成为一种能够实现的前景。2013年9月18日，谷歌公司宣布成立嘉立科（Calico）[48]，一家旨在大幅延长人类寿命的公司。伟大的抱负支撑着谷歌的这个子公

司，它的中期目标是，用十到二十年的时间，构想并探索使用创新技术来延迟死亡并“杀死”死亡。嘉立科的诞生给健康领域带来了重要影响。谷歌公司之所以加入抗衰老的斗争，也是因为医学越来越依赖于信息技术。想要理解人类的生理功能，就需要掌握大量数据：例如，一个个体的DNA序列代表了十万亿条信息。谷歌认为自己能够掌握大量的必要数据，从而能用个性化的方式对抗疾病。尽管如此，生命科学的加速发展还是会带来重大的哲学和政治问题。为了遏制死亡，我们能将我们的生物属性、我们的DNA更改到何种程度？我们是否应该追随超人类主义者，对自身进行无限的改造以对抗死亡？

先天，却并非不可变

遗传的重负通常被认为是不可变的。因此，个体的深层属性通常与其基因谱相关联。这个想法虽然有道理，但也具有一定的误导性。想想吧，妄图通过观察一个人的基因去了解他的一生，正像是想通过观察一辆成品汽车离开组装线来预测它以后会遭遇的交通事故一样。驾驶者的个性，汽车所走的道路类型，与之相遇的其他车辆，都和汽车本身的技术特性一样决定着事故的发生。家庭环境和情感环境比基因遗传更能塑造个体的发展。如果甘地与波尔布特的成长环境相同，也许他会成为一个同样恶劣的独裁者，反之亦然。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：想要不惜一切代价终结死亡的执念是令人同情的。这个执念源自一种近乎野蛮的态度：我们忘记了正是因为死亡，才有了一切代表生命的表现形式，它们制造了文化（如果没有死亡，哪里还会有艺术作品——绘画、音乐、文学……？）和集体生活（如果我们作为不死的存在能够自给自足，那为什么还要生活在一起呢？）。永生不死意味着欲望的消亡，因为此时感到别人的缺失以及渴望与别人建立牢不可破的关系的理由都是不恰当的：只有当时间能加剧欲望，并且我们能预感到这种紧张感永远不会消失时，欲望才存在。这就是在柏拉图之后我们的发现，我们把它视作人类深刻的情欲属性。通过抑制有性生殖，代之以克隆（对本体进行毫厘不差的复制），并与永生联合到一起，超人类主义者展示了他们对欲望对象之所以存在的象征意义的蔑视。与机器的融合最为粗鲁地体现了犬儒主义摒弃世俗欲念的主张，它旨在扼杀人类所具有的一切可以使之成长的资源（如尼采所说：“一切杀不死我的东西使我成长。”）以及一切使之能够爱的资源（对人生苦短的体悟是使每个人向他人敞开心扉的第一动因）。对永生或者只是对无尽的寿命的展望，让我们热爱死亡，因为正是它缔造了人的生命。我们由这种矛盾造就，但正因为我们是矛盾的，我们才是人；我们之所以是自相矛盾的，是因为我们是语言的生物；这也是超人类主义者所忽视的，他们有时想要取消语言交流，代之以心灵感应，这种心灵感应可以创造一种和蜜蜂或者蚂蚁一样有纪律的集体生活（利用信号进行机械的交流而不是调动

符号进行对话）。当然不行，除非想成为一个可笑可怜的动物，否则没有人愿意活几个世纪。

7　超人类主义是优生学吗

有一个幽灵徘徊在超人类主义运动的周围，那就是优生学。通过消除最弱者，对人类物种进行针对性改良，这始终与纳粹主义最严重的罪行联系在一起。然而，超人类主义者声称自己提出的是一种带有人文主义色彩的优生学，其宗旨是对每一个人进行改良。

让-米歇尔：针对这一章所提出的问题，答案当然是肯定的：多亏了NBIC技术，超人类主义把改良人种的野心变得稀松平常。这种想法在我们同代人当中尤为普遍，因为大家都有着避免齐奥朗[49]所说的“诞生之不便”的固念。在德国哲学家尤尔根·哈贝马斯[50]看来，有一个表达可以阐明其本质，即“自由主义优生学”，也就是要求给那些愿意被“改良”和那些能负担得起的人提供生物技术所带来的好处。实际上，超人类主义是现代性到来时形成的诸多承诺之一。我们也可以把它看成是笛卡儿式的，因为它和笛卡儿一样承诺，借助于医学，人类至少可以活到100岁（当然可以更多）。超人类主义重现了孔多塞[51]在18世纪做出的预言：伴随着科学的进步，我们可以终结死亡。它延续了优生学的伟大捍卫者弗朗西斯·高尔顿[52]在20世纪初时的期望：用生物学改善人类，使之能够达到自己所创造的机器的高度。让·罗斯丹在他自己的书《超人的界限》中表达了自己对超人类主义的乐观态度，这本书我在第一章就提到过，作者表达了我们可以对生物学怀有的全部希望，具有浓厚的人文主义色彩，这种人性的征服可以让我们摆脱自身固有的缺陷……简言之，超人类主义为生产取代生育、摆脱疾病和衰老、“提升”智力的合法性提供了最好的保证。

洛朗：我要提醒你的是，“超人类主义”这个词是在1957年由朱利安·赫胥黎[53]提出的，他是《美丽新世界》一书的作者阿道司·赫胥黎的哥哥。他在战前是左派优生主义者，相信通过生物学的手段可以改善劳动力的身体条件。随着纳粹发动大屠杀，“优生学”这个词开始变得邪恶，于是他发明了这个新词！超人类主义者支持的是一种激进的人权观。他们认为，每一位公民都是一个自主的人，他不属于任何人，只属于他自己。随着科学的进步，也只有他自己可以决定他想对自己的大脑、DNA或是身体做何种修改。他们认为疾病和衰老并非不可避免。超人类主义者的核心目标是驯服生命以增强人类的能力。在他们看来，人类应该毫不犹豫地利用科学实现所有可能的转变。这事关把人类当作NBIC技术的实验田：人类永远在进化，日复一日地进行自我修改和自我完善。未来的人就像是一个永远处于“公测”状态的网站，也就是一个致力于不断完

善自己的原生机体。这个想法可能看上去幼稚。实际上，超人类主义的游说团体已经运作起来，主张接受用NBIC技术来改变人类。从加利福尼亚到中国和韩国，这股力量在太平洋沿岸尤为强大，毗邻正在成为世界经济重心的NBIC技术产业。超人类主义者的渗透是惊人的：美国国家航空航天局（NASA）和全球互联网始祖美国高等研究计划署网络（Arpanet）曾处于超人类主义战斗的前沿。而现在谷歌公司成了超人类主义的领军者，并承诺将我们带入一个旨在增强人类、发展硅智能并消灭死亡的超人类主义文明。

谷歌和奇点

谷歌公司已经成为NBIC革命的主要缔造者之一，它积极支持超人类主义，并为培养NBIC技术专家的奇点大学提供赞助。奇点这个术语指的是人类智慧被人工智能超越的时刻，而人工智能将从2045年起成倍增长。“超人类主义教皇”雷·库兹韦尔负责管理这所大学。这位人工智能专家确信NBIC技术可以使死亡率从21世纪开始大幅降低。他被谷歌公司聘为首席工程师，把谷歌的搜索引擎变成历史上第一个人工智能。谷歌的子公司23andMe[54]对基因测序很有兴趣，这家公司由谷歌公司的联合创始人谢尔盖·布林的前妻领导。谢尔盖·布林让这家公司分析了自己的DNA，知道了自己有很大的概率罹患帕金森病，因为他携带发生了突变的LRRK2基因。这让他对NBIC技术的兴趣更加高涨。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：谁又能坚决反对杀死死亡的项目呢？但是在我看来，这个项目的背后，正如我们所讨论过的，总有着某种这样或那样的优生学。其中的一种形式甚至体现了人文主义的价值观（割裂自己的动物属性，达到精神荣耀的至臻理念）。哪怕只是一点超人类主义的苗头，也能体现这一点，我也不用再对此赘述什么。由此也可以辨认出法国超人类主义协会（AFT）的基本态度，它甚至纠正了“自由主义优生学”这个表达中隐含的异议，因为“自由主义优生学”似乎预示着我们注定无法平等共享生物技术带来的好处：该协会认为，NBIC技术给每一个人提供延长寿命的可能，可以实现平等的理想图景。谁会不想要呢？但是我们可以从超人类主义最引人注目的形式里清楚地看出它并不会就此止步：超人类主义甚至可能会继承“二战”以来优生学所背负的邪恶形象。因为“消极”优生学（旨在矫正残疾，使能够存活的、具备物种共同优势的个体诞生）在大多数激进的超人类主义者看来是远远不够的，他们要求的是“积极”优生学（旨在根据前所未有的新模板和新范式制造人类，这将成为准则）。为“积极”优生学的辩护越来越为人所接受：它宣称人类可以通过技术手段逐渐控制自然选择，例如采取手段降低过去居高不下的婴儿死亡率。这样一来，没有经历过筛选就出生的人有使人种退化的危险，因为这让越来越多低能的人得以存活。我们必须避免利用技术手段掌控生

命会带来的不利影响，为此，我们要让符合我们期望的人出生（经过胚胎筛选，没有21号染色体，没有进行性肌萎缩，没有像德国哲学家尤尔根·哈贝马斯一样患唇腭裂的人，等等）。

洛朗：你正好提到了21-三体综合征。这正是我在我们对话开始时提到的，用来证明我们是在毫无觉察的状态下坐上了优生学滑梯的最好的例子。如果没有哲学或政治辩论，我们就会走偏。一些父母已经对BRCA1和BRCA2基因异常的胎儿进行终止妊娠，因为这种基因异常表明孩子在成年之后患上乳腺癌或卵巢癌的可能性很高（分别为70%和40%）。就算不考虑任何道德因素，这样的选择也是不合理的：乳腺癌很可能在2040年或2050年，也就是他们的孩子发病时得到控制。还有另一个例子，LLRK2基因的突变会使每三个携带者中的两个罹患帕金森病，该疾病大致会在40岁以后发作。一个在2015年被诊断出基因突变的孩子在2055年之前不会发病。终止妊娠的决定不应该依据该疾病在2017年时的严重程度，而应该依据孩子发病时的严重程度来做出。医生和家长面对的是一场技术赌局：病理学管理在未来几十年后将如何发展？到了2030年、2040年或是2060年，某种目前致命的疾病还依然会是致命的吗？没有任何医疗机构能有如此的远见，而医学界还从未考虑过这一点。然而，如果不想对胎儿进行终止妊娠，培养具有技术预见性的医生是很有必要的，随着医学的发展，治疗这些胎儿的疾病在未来可能会变得容易。

让-米歇尔：最重要的是，优生学并不满足于抑制子宫孕育。它的拥护者们相信，有必要利用我们的能力对自然选择进行补充和介入，让将要出生的人获得最好的遗传物质和我们能够对他们的基因组进行的一切修缮。从长远来看，积极优生学的产物（必然来自生殖性克隆，终结了有性生殖带来的杂交偶然性）会使消极优生学毫无用处，因为完美的人将在生存的战斗中处于支配地位，也就是说，他具备所有的选择性优势。

洛朗：这就是对未来婴儿进行DNA测序具有革命性的原因。在这之后，从2030年起，基因疗法能使我们修正威胁人类大脑功能的基因突变。达尔文自然选择说的终结将促使我们开展针对大脑的基因工程，这会颠覆我们的未来。我们还要更进一步：从预防最糟糕的情况到对孩子进行筛选之间，只差轻松跨越一步。优生学的回归是一个被忽视的政治炸弹。连带着，有性生殖的消失是可能的，因为胚胎的制造和筛选都是以体外受精为前提的。

让-米歇尔：毫无疑问，这是一个政治炸弹。消除偶然性的愿望是所有极权主义萌发的因素：创造一个听话顺从且容易被控制的新人类；让历史不再包含有限性和自由带来的偶然性；达到一种不让时间本身产生新事物的所谓“完美状态”。我们会回想起优生学在某些社会（并不总是极权主义的社会）的幻想中具有了权威主义的形式（而不是自由的），就像在20世纪的美国或者瑞典，但这又有什么用呢？超人类主义者是不会适可而止的：如果我们有用于制造人类的生物技术，那就应该去实

现，以避免一切生命都会有的缺陷，也就是冒险和自由，这被1965年诺贝尔生理学或医学奖获得者弗朗索瓦·雅各布[55]称为“可能的修补”。

8　人工智能会杀人吗

如果人类在未来的几十年里被自己创造出的工具超越了，也就是超人类主义的拥趸所说的“奇点”到来了，人类该如何应对？或者说如何对抗？人类在智力方面还有什么优势？

让-米歇尔：在一封于2015年7月27日发布的公开信中，有超过一千位的精英（其中包括工业家埃隆·马斯克、语言学家诺姆·乔姆斯基[56]、天文物理学家史蒂芬·霍金、微软创始人比尔·盖茨）联名宣称人工智能会给人类带来非常严峻的问题。早几个月之前，霍金写下这样一句话：“某种完备的人工智能的发展可能意味着人类的终结。”略显夸张的话语背后，是你经常引用的雷·库兹韦尔的预言：到2045年，一种非生物的智能会使人类智能作古。但是我们提到的这封公开信只强调了“能够在没有人为干预的情况下选择和攻击目标”的自主武器的发展会带来军事风险，而人工智能的影响要比自主武器更为深远，事关一种更为有害的“存在性风险”：人工智能正通过剥夺我们决定自己命运的权利来杀死我们身上的人类特性。简言之，机器给人类带来的危险至少与核能带来的危险程度相当，但是机器带给人类更危险的是“去道德化”。在公众心目中，机器实际上与人类失去存在自主性的一面紧密相关，我们会发现自己退化到黑猩猩的状态。实际上，这样的威胁由来已久：自工业革命以来，机器似乎成了让人的无助感越来越强烈的原因。它是奥地利哲学家京特·安德斯[57]所描述的“普罗米修斯式的耻于自我”的原因，是轻视自我的一个因素。但仿佛各式各样的制成品和自动装置还不够，机器如今似乎垄断了智能，一切已成定局：机器会从我们所拥有的更为具体、更有价值的部分入手，将我们取而代之，因此机器会使人类逐渐消失（不是突然消失，如果我们至少能够避免机器在人类身上展现自己军事破坏的潜力）。整个“存在的”问题是要知道为何机器似乎夺走了人类的智慧，而我们为何居然无法想象去挑战它的权威？

人工智能简史

科学家们在战后有两个信仰：具有自我意识的人工智能触手可及，以及人工智能对完成一些复杂的任务是不可或缺的，然而这是一个双重错误。1940年，英国数学家艾伦·图灵为人工智能奠定了基础，但直到1956年夏天美国达特茅斯学院会议之后，这项研究才真正起步。在场的科学家都确信一个能媲美人类的电子大脑很快就会出现。很多人工智能学科的奠基人都出席了这次会议：马文·明斯

基、约翰·麦卡锡、克劳德·香农和内森·罗切斯特。他们认为，几千行计算机代码，几百万美元和二十年的工作就可以抗衡人类的大脑，因为人类的大脑就是一个比较简单的计算机。失望是巨大的：1975年的计算机还是原始的。于是研究人员意识到制造智能程序需要更强大的微处理器，当时的微处理器每秒只能进行几千次操作。与此同时，对公共补贴的竞争时常会让研究人员对公共或者个人赞助者做出完全不切实际的过度承诺，赞助者们最终发现了这一点。第二次热情的浪潮退去始于1985年的日本，科学家们再一次被人类大脑的复杂性折服。人们给这段梦想破灭的时期起了一个好听的名字——“人工智能的冬天”。从1995年起，由于科技取得实质性进展，相关投资又回来了。1997年，计算机“深蓝”战胜了国际象棋世界冠军；2011年，沃森（Watson）专家系统在电视节目《危险边缘！》中战胜了人类；2015年，沃森系统可以在几分钟内做出关于身体和骨骼的癌症分析，而人类癌症专家需要花几十年才能完成这种分析。此外，很多大型的计算机应用程序，例如谷歌、脸书、亚马逊等，都是源自对人工智能的研究，只是公众对此并不了解。

洛朗·亚历山大

洛朗：我们无法质疑它们的能力，因为它们的能力已经超过了人类。谢尔盖·布林曾在2014年宣称：“我们要制造出一种机器，它所具有的思考、推理和工作能力比人类的更为优秀。”这位谷歌公司联合创始人的预言为文明的改变刻下印记：硅将会超越神经元。算法未必会杀死我们，但它能创造出一个革命性的局面。人工智能会把人类带入一个不再有工作和金钱的文明。过去，人工智能一直是科幻小说里的主题，今后，它的实现只是一个时间问题：计算能力的爆发式增长（计算机服务器的运算能力在31年内增长了10亿倍）使得人工智能有望在接下来的几十年里超越人类智慧。

让-米歇尔：你使用了“智能”这个词。我发现如今这个词被广泛使用：智能手机、智能汽车、集体智能，等等。形容词“智能的”今后会和所有可以释放和接受信号并做出相应反应的东西联系在一起。这样真的合理吗？智能这个概念出现的语义收缩本身就是一种征兆：一种幻灭的征兆，或者说一种人类自我呈现发生令人不安的简化的征兆。行为主义人类概念的盛行使我们当中的每一个人都成为受害者（我们只是接受和输出信息的黑箱，由心理学家负责厘清黑箱之间的关系，并描述出支配这些关系的定律）。20世纪初为公立学校的低能儿发明智商测试的心理学家阿尔弗雷德·比奈[58]的公式可以说服我们：“什么是智力？答：就是我的测试测量的东西。”当然，可能需要终结一种把智力变为一种灵魂能力的哲学观念，这种观念认为上帝向灵魂中注入了一些永恒的思想，正是有了这些思想，我们才具备解决问题的能力，因为我们所拥有的可以对环境刺激做出反应的本能太少了……我们需要一门智力的科学。但引入这种科学是否就是承认所有的智能都是通过计算体现的，也就是说，除了计算还是计算？这解释了算法机器不断取得胜利所带来的问题：一

切智能都是通过计算来体现的，一切生物都需要通过计算来辨别方向、做出反应和进行决定，而机器可以迅速地完成这一切，它们的速度也会越来越快。人类运用自己的智力设计和制造这些机器，接着人类被它们超越，于是人类就会灭亡！

洛朗：你的这种想法和哲学家们是一致的，哲学家们担心对人工智能的使用会导致自由意志的终结，他们对此做出大量毁灭性的预测。我们害怕的是超级人工智能会成为人类的敌人。DeepMind[59]的创始人认为这样的情况在几十年内不会发生，但是我们真的能放心吗？教一个机器欺骗、支配、超越人类是否合理？教它在围棋比赛中隐藏自己的意图，或是采取强势激进的策略是否明智？NBIC的专家尼克·博斯特罗姆拥护这样一种观点：在宇宙的一个区域内只能有一个智慧物种。由于所有智慧物种（生物的或人工的）的首要目标都是生存，人们可能会担心人工智能为了防备人类将其扼杀，而把自己的侵略性意图隐藏在互联网深处。我们甚至无法理解它的计划：2016年3月，阿尔法狗击败了世界最佳围棋选手，它在比赛最开始被认为是严重错误的走棋，实际上是天才的着数，这证明了人工智能具有超越人类理解能力的巧妙战略。人工智能是否会在2050年之前对人类产生敌意，我们不得而知，但是如果我们不抓紧改革我们的教育体系，革命就可能会发生。这不只是关乎技术，这将会是一场由世界上99%的人口发起的真正的革命，因为他们在人工智能占据优势的世界里没有立足之地，又被盲目的教育置于可怕的绝境。目前，学校培养的年轻人将会进入劳动力市场，这一情况至少还会持续到2060年。这些学校必须为应对未来世界的变化做出前瞻性的努力，需要确定在哪些为数不多的领域里，人类智慧是必不可少的，或是要与人工智能进行协同工作的，并以此为前提指导学生。

两种人工智能

人工智能有两种类型。强人工智能可以产生智能行为，感受真正的自我意识、情感和对自己推理的理解。弱人工智能旨在通过模拟智能建立自主系统和能够解决技术问题的算法。我们不确定到2050年是否可以拥有强人工智能，但是弱人工智能已经可以执行人类的许多任务，比人类的大脑完成得更好，这是科学家们未曾想象到的。在《第二次机器革命》（2014年）一书中，埃里克·布林约尔松[60]和安德鲁·麦卡菲[61]已经证明了融入机器人中的弱人工智能正在以怎样的速度颠覆全球经济。弱人工智能是革命性的：谷歌汽车的自动驾驶要比人类驾驶更为安全；到2030年，外科手术机器人做的手术会比任何一个外科医生做得都要好。弱人工智能可以完成越来越多的任务，也比人类完成得更好。2016年3月，由谷歌全资子公司DeepMind开发的阿尔法狗战胜了韩国棋手李世石，这标志着非生物智能历史中的一个关键阶段。在十年或者二十年前，专家们并没有预料到一台机器可以战胜一位围棋冠军。人造神经网络、机器学习和深度学习具有极高的效率，见证了脑科学和信息技术的融合：作为神经科学家、开发人员和顶级玩家的戴密斯·哈萨比斯

[62]在完成了神经科学的博士论文后创立了DeepMind，并将其转售给谷歌。在摩尔定律（根据经验证明，微处理器的计算能力每18个月翻倍一次）减缓的时期，机器学习领域会出现一个新的指数趋势。这是一个爆炸性的消息：使用软件比使用处理器更容易获得指数级增长。我们无法在每天早晨重新设计微处理器，但是阿尔法狗之类的软件可以被不间断地改进。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：我发现你对智力的定义非常狭隘。稍微有一点儿常识，我们就会发现智力可以通过很多种方法来表现，也就是与自身所处的环境建立和谐稳定的关系；稍微有一点儿政治意识，我们就会去质疑被普遍承认的直抵存在深幽之处的计算逻辑。心理学家霍华德·加德纳[63]认为有8到9种认知能力是物体、植物（啊！向日葵可以根据太阳的位置辨别方向）、动物或者GAFA所不具备的：感知节奏和音乐的能力、内省的能力、交际的能力、处理与自然关系的能力、感知存在的能力……至少这些能力可以使人类免受机器的羞辱（像机器在围棋比赛中战胜人类的那种羞辱），至少不用再去理会“大部分中国人的智商将超过160，并将大规模征服世界”之类的杞人忧天，至少这些能力可以淡化史蒂芬·霍金所说的风险：如果人类只是笨拙地模仿机器，那么只能走向灭亡，除非像新事物的首倡者一般去体验一种基于抵抗现实的生存，其符号功用（语言、文化、艺术）始终是对抗现实的酵素。

洛朗：你似乎忽视了我们已经处于一个算法的世界。阿尔法狗标志着人工智能战胜人类的开端：几乎没有哪种人类的活动能幸免于此。从短期来看，硅制大脑的到来给大部分职业构成一项巨大的挑战：如何在一个智能不再定额分配的世界里生存？到目前为止，每一次技术革命都体现为职业在产业之间的转移：例如从农业到工业的转移。而人工智能的到来带来了巨大的风险，因为很多职业不是被转移而是被摧毁。甚至一些需要资质的工作也不例外！在放射学中，人工智能在诊断某些类型的肿瘤细胞转移方面已经超越了人类。脸书公司的人工智能研究总监杨立昆[64]预测人工智能很快就能超过最好的放射科医生。

让-米歇尔：杀死人类的肉体，杀死人类的精神或是夺走人类的工作。人工智能会以不同的方式成为谋杀人类的杀手。机器人专家往往不认同生命未来研究院表达的担忧，这种担忧正是在我们交流开始时我所提到的那封公开信发表的根源。而且最近他们在阿尔法狗战胜人类时公开表达了这种态度。此前，他们对“深蓝”战胜国际象棋冠军加里·卡斯帕罗夫或者沃森专家系统在《危险边缘！》节目中获胜都表现得非常低调。我们为什么不听从他们而要任自己惊慌失措呢？可能是因为他们设计和制造的机器所具有的复杂性给我们留下了深刻的印象。实际上，我们很难想象安放在阿尔法狗内部、用来指挥它行动的并行多层神经系统装置是什么样的。

通常来说，无知会让我们感到无助，于是我们觉得人工智能会毁灭人类。天会塌下来——这就是雷·库兹韦尔告诉我们的！然而，这些机器人专家对他们制造智能的行为没有丝毫顾虑。一些人甚至想要给他们的机器注入意识。他们一边制造危言耸听，一边却号称想要消灭它。为了避免纵火消防员的出现，他们必须清醒，但是他们做不到，因为长久以来，我们对处在舆论中心的智能问题一直没有清晰的理解。

洛朗：可是怎样才能清醒？谷歌的人工智能或许无法被禁止，但是应该在世界范围内对硅制大脑的管控进行反思，特别是因为谷歌的胜利将加速互联网巨头之间的工业斗争，而这些互联网巨头将人工智能置于人类文明的中心。在未来的几十年内，人工智能警察将至关重要。GAFA和IBM公司为此投入巨资，但是谷歌是它们之中走得最远的。

9　经济会面临怎样的挑战

正在进行中的技术革命也是一个经济问题。这一进程把对个人信息的获取作为21世纪新的原材料，就像煤炭在19世纪扮演的角色一样。经济实力远超许多国家的GAFA是其中主要的参与者。

洛朗：我们已经强调过谷歌高管所做的超人类主义的承诺。但是，从更广泛的角度来说，整个数字生态系统，尤其是硅谷，都是拥护超人类主义思想的。2016年3月，谷歌开发总监雷·库兹韦尔表示，我们将在2035年左右使用接入人类神经元的脑内纳米机器人来连入互联网。已是神经技术领域世界第一的谷歌公司，现在打算迈入对人脑掌控的新阶段。首先，谷歌通过搜索引擎、谷歌地图、谷歌汽车和其子公司巢（Nest）[65]对身处现实和网络世界里的我们加以引导。然后它开始存储我们的一部分记忆（Gmail，Picasa[66]）。这个新阶段将以一个真正拥有意识的人工智能的出现为开端。正如我们之前提过的那样，库兹韦尔认为这种人工智能会在2045年粉碎人类智能。这位谷歌高管认为，到那时，人工智能会比所有人类大脑的总和还强大10亿倍。目前，谷歌高层公布的最新阶段是将人工智能与人类大脑相连。连埃隆·马斯克也对这项大脑提升计划表示出浓厚的兴趣。

2016年6月2日，库兹韦尔在Recode大会[67]上宣布，面对人工智能，人类要想活下去就必须尽快把自己的神经元与电子元件连接起来！

让-米歇尔：你在强调谷歌和位于硅谷的企业。在我看来，问题似乎更为复杂。任何坚定地把自己的繁荣归功于技术创新的企业，都会主动追随超人类主义者的惊人宣传。创新文化首先是让市场去决定一款产品是否应该被保留和发展。设计这款产品的初衷并不是为了满足某种特定的需求，成为程序化思维的反应，它更像是工程师、设计师、金融家和工业家们理念的呈现。他们的想法决定了该商品能否在消费市场上被选择。新达尔文主义模式的出现成了这个经济的指导原则，它不再是“道德和政治的科学”（经济学家阿尔伯特·赫希曼[68]的书名），也不是简单的无形的手，而是超自由主义或自由意志主义的宗教，等待一台能为创新带来大量的大胆创造者的巨型机器。从这个意义上讲，现在正在努力增加“应用程序”的初创企业具有了为超人类主义事业服务的特点：在昭示着即使不是后人类，至少也是人与机器相互协作的阶段到来的改变发生之前，为市场引入可以全面扩张的创新产品。所谓的信息经济是受库兹韦尔影响的奇点主义者们的预言蓬勃发展的领域。其中，创造力是由对智能物体、未必能实现的界面和使人类的生活变得更便捷，实际上也就

是能使之更好地连入网络的数字平台的构想和提议所衡量的。一个名为“SoonSoonSoon”的法国网站就以之为特色：通过众多生活在世界各地痴迷于创新的夜猫子（他们称之为“生活方式”）的帮助，把各种天差地别的小玩意儿收集在一起，它们昭示着下一次技术创新会给人类生活带来的变革。人体健康是这一系列创新中最受欢迎的主题。为了延长寿命，人们已经做好了在日常生活中接受一切的准备：电子手环、食物扫描仪、振动叉（由勒平[69]先生的孙子研发！）、互联网听诊、廉价破解DNA、通过胶囊注射的纳米机器人……

谷歌医生，我的病严重吗

到2030年，所有医疗诊断都必须依靠专家系统才能实现。那时一份医疗文件中的数据会是现在的100万倍。这个变化是基因组学、神经科学和互联网接入设备共同发展的结果。例如，对一个肿瘤进行全面生物分析意味着20万亿的数据。许多电子传感器很快就能监测我们的健康状况：类似用于糖尿病患者的谷歌隐形眼镜这样的连接物，每天能为每个病人提供数万亿的信息。“谷歌X”这个秘密实验室正在开发一种通过纳米微粒对疾病进行超早期检测的系统，纳米微粒也会生成大量信息。医生们面对的是一场真正的“数字风暴”：他们不得不分析数万亿的信息，而现在他们只需要管理非常少量的数据。即使是豪斯医生，他也会对如此大量的数据束手无策。这个行业能够适应这样的突变吗？现实情况是，IBM公司研发的沃森专家系统能够在短时间内分析数十万部的科学著作，以了解癌症的突变。而这项工作，哪怕是仅仅针对一位病人，也需要肿瘤学家夜以继日地工作38年才能完成，这会比病人，乃至肿瘤学家的寿命都长。由于不再需要医生去验证医学将会产生的数十万亿的信息，我们将见证医疗力量发生激烈而彻底的变化。医生要在自己设想不出的处方上签字。到了2030年，医生有极大的风险变为护士：听从算法的安排，就像现在护士听从医生的安排一样。还有另一种附带效应，医学伦理将不再是医生脑中清楚明确的产物，而或多或少是由专家系统隐晦地提出。医疗和道德的力量掌握在这些软件的设计者手中。这些专家系统将成为充满智慧和权力的怪兽。数字经济的领导者们（谷歌、苹果、脸书、亚马逊），包括IBM和微软在内，可能会成为这种新型医学的主宰。

洛朗·亚历山大

洛朗：所有这一切其实都是次要的。用不了几十年，谷歌将改变人类。它从一个搜索引擎，变成了一个神经假体。雷·库兹韦尔骄傲地宣称：“大概15年后，谷歌甚至可以在你提出问题之前就给出你问题的答案。谷歌会比你的伴侣更了解你，甚至可能比你自己都更了解你。”他本人也相信，到2045年，人类可以把记忆和意识转移到微处理器上，这使得我们的精神在肉体死亡之后还可以继续存活。信息技术和神经学合二

为一了。

让-米歇尔：与此同时，所有通过信息发展壮大的企业显然都愿意追随超人类主义者的步伐。哪家公司能对获得所有信息这件事有抵抗力？收集数据，开发数字网络，将用户转变为产品，从中获取他们同意（或不同意）出让的信息……GAFA是这个阵营的急先锋，其次是所谓的“社交网络”“保险公司”“衍生基金”“搜索引擎”或者“在线商店”。在《网络：谁拥有我们的未来》（2014年）一书中，加利福尼亚的数字技术先驱之一，杰伦·拉尼尔[70]描述了“海妖服务器”，这个服务器在网络上快速扩散，一般不需要支付任何费用就可以收集大数据。这些大数据通常需要更多的人工智能来处理，因而也是为超人类主义者提出的技术断裂的情景做了预备。对组成信息经济的非物质的管理和利用，自然会推动我们所说的认知资本主义经济的发展，并且证明金融机构（长期资本、安然……）崛起的合理性。这些金融机构让我们感到丧失了所有的主动性，超人类主义者将之变成自己的论据，让我们相信奇点的到来。令人惊讶的是，经济学家们对此并没有更多的预见，他们抛弃了展望和规划，转而坚持建立复杂体系的模型。在这些复杂体系中，全球化和对市场管制的放宽将我们淹没。很简单，算法占据了主导地位，而决策（例如投资进入市场或是退出市场）只是基于数据库中统计数据呈现出的相关性。而这个数据库要求的更多的是人工智能而不是人类的大脑灰质。在这里，技术化社会的经济活动再次揭示了它对超人类主义关于人类不再创造未来的观点的支持。杰伦·拉尼尔所说的“人文信息经济”就注定显得非常乌托邦。

金钱的末日？

在我们所处的能力主义社会中，收入和资本的差异主要是被知识能力的差异（正确或错误地）合法化。但是，人工智能打破了这个关键。面对机器的能力，人类智慧最终将是可笑的：在这个新世界中，人类是否可以接受1比1 000的收入差异？如果我们接受谷歌高层提出的在脑中加入假体的提议，那么人类之间收入差异的合理性是什么？因为此时人类的能力与脑中假体的能力相关，而与人本身的素质无关。此外，人工智能社会可能是一个没有工作存在的社会，这会导致货币的功能被剥夺。例如，当10亿癌症研究人员能在短时间内被模拟到硬盘组上，那么人类肿瘤学家的价值何在？所有的商品和服务都可以由机器以比人类（即便是增强过的人类）更有效的方式发明和生产，能力主义的系统就会岌岌可危：如果没有价值，如何组织资本的分配？最好的解决方法可能是给每个人平均分配商品和服务。这会是一个共产主义2.0的社会，每个人根据自己的需要而不是所付出的劳动获得收入。这将是由人工智能，而非经济学家托马斯·皮凯蒂[71]，畅销书《21世纪资本论》（2014）的作者，去消除收入的不平等。资本主义无法在智能机器的世界中生存。

洛朗：非常同意。神经技术实际上是极富革命性的，因为它打破了社会秩序。我们能够从中逃脱吗？“反神经革命”是否可行？答案可能是否定的。从长远看，一个拒绝与电子电路混合的人在劳动市场上几乎没有任何竞争力。我们能想象出一个拥有两种速度的社会，其中没有经过增强的人会不可避免地成为贱民吗？另外，不去提高那些天赋差的人的认知能力符合道德吗？人类对人工智能和机器人技术融合导致的后果缺乏政治层面的思考，这让比尔·盖茨本人心烦意乱。他估计到2035年，自动机将取代大部分职业，其中包括医疗健康职业。谷歌内部也对神经技术的崛起感到担忧，为此公司刚刚成立了一个关于人工智能的伦理委员会。它必须反思这些关乎全人类的质问：应该给人工智能设限吗？如何控制人工智能？应该让人工智能与人类的大脑接触吗？脸书的人工智能总监做出令人放心的样子：2016年6月17日，他在《费加罗报》上公开表示，《终结者》的剧情在20年内不会上演。但是20年并不遥远！在一个可以给大脑植入假体的时代，神经操纵、神经黑客以及神经独裁成为可能的风险是巨大的。我们必须制约神经改革者的权力：对自己大脑的控制权必须成为人权中的第一要义。

10　需要制定规则吗

新技术带来的动荡是不可避免的吗？国家可以为此做些什么？能否紧急创造出一种技术民主以应对超人类主义带来的巨大挑战？

洛朗：人类很少面对如此巨大的挑战。长期引领人类命运成了最为重要的政治任务。但是这场会彻底改变人类文明的革命是在数字巨头和中国领导人的倡导下，发端于环太平洋地区。在对网络世界进行殖民之后，GAFA在机器人、人工智能、遗传学、纳米技术方面占据了强势地位。中国领导人如同训练有素的工程师，正在积极推动中国2050计划。尽管我们的政府之前还是世界的领导者，但在面对这些创造未来的角色时，必将陷入困境：国家的最高领导层通常都是不懂技术的。未来学家若埃尔·德·罗斯奈[72]说得很有道理，要理解未来必须先热爱未来。爆炸性的NBIC技术证明了重塑国家监管作用的合理性。技术与法律相融合："代码即法律"（Code is law）成了一种政治现实。由于过度弱化自己守护人的角色，国家正在自掘坟墓，任由技术以越来越快的速度建立社会秩序。不知不觉间，权力的重心发生转移，因为技术比法律更强大。硅谷大金融家彼得·泰尔[73]的话很有意思："一个大公司就是一个改变世界的阴谋。"高科技企业认为自己拥有政治话语权！

让-米歇尔：在我看来，主要问题不是国家，而是民主。因此我要重新整理一下我们讨论的问题：如何管控我们在研究过程中获得的掌控人类的能力？这通常是生物伦理学的研究对象，但当我们理想地把它看作决定美好生活的前提条件时，它其实与政治的关联更为密切。所以我们要承认，技术本身就是无法进行自我约束的：事实上，它恰恰集中体现了人类所能够达到的自负程度（希腊人称之为傲慢[74]）。只能借助外部力量对它进行遏制，也就是说，它必须通过属于思辨和符号范畴里的事物（语言所能允许的政治沟通）得到缓和。

一个针对NBIC技术的伦理委员会？

关于技术创新的伦理规范，我们可以参照生物技术的先例。1983年，在弗朗索瓦·密特朗执政时期，法国成立了国家伦理咨询委员会（CCNE），试图引起当代人对生物伦理问题的关注（委员会除了定期向公民提供意见外，每年会召开一次公开会议，作为对关注度的测试）。CCNE给出的咨询意见并不是以获得法律效力为目的，而是为了促进立法者的工作。（近期修订的）有关生物伦理的

法律很大程度上受到了这些意见的启发。只要这些法条反映了生物医学技术引发的担忧（如成像、转基因、干细胞……），它们就会成为道德领域监管的对象。也就是说，我们通常认为，是由政治当局（部长议会、共和国总统）任命的顾问们对“人类技术”权重的确定进行审议和决定。

让-米歇尔·贝尼耶

为了更进一步并避免伦理规范过于专业化，我们应该走向技术民主——科学社会学家米歇尔·卡龙[75]和布鲁诺·拉图尔[76]坚持这一点。技术民主替代的是把决策者和用户、专家和非专业人士对立起来的所谓代议制民主。它不会把自己局限在政府决策的层面，而是把可以进行伦理审查的人员范围扩大到受生物技术演变影响的不同参与者身上（患者、护理人员、研究人员、工业家、工程师……）。为了能够对创新进行讨论、开展社会评估和颁布调控规定，一些诸如混合论坛[77]或是公民会议的手段被采用。其关键在于“政治化”人类改良技术——对这些技术进行推论性解读，使它们接受民主仲裁。这是一场旷日持久的奋斗。这让我们想到欧盟做出的决定：经过公民讨论，欧盟决定给位于洛桑的人类大脑计划提供高达10亿欧元的财政资助，用来支持其人工大脑项目。可以肯定的是，如果是由科学界人士和来自工业技术科学文化中心（CCSTI）的“学识渊博的非专业人士”对此进行共同审查，这个决定是不会被采纳的。法国国家农业研究院（INRA）等研究机构已经开始了“预研咨询”，动员用户协会和“非专业人士”参与。这个想法是好的，可以避免当政府想为确定技术的接受度而组织公众讨论时，自己却走入死胡同的情况。

洛朗：不幸的是，政治体制受到舆论情绪和压力的制约，这会逐渐削弱历来与社会长期利益保持一致的国家的合法性。从逻辑上讲，政治上的无能导致了对专制主义需求的增长。信息网站Atlantico进行的一项调查显示，67%的法国人认为应该把国家的管理权交给没有参加选举的专家，40%的法国人支持专制政治权力。

让-米歇尔：要是这个专制政治权力决定改良人类、增强人类呢？这个问题值得一问。是为了让被增强的人在当今社会的竞赛中更具竞争力？是否如英国科学家弗朗西斯·高尔顿在20世纪初倡导的优生学那样，是为了让他和我们放任增多的机器达到相同水平，还是因为他脆弱的状态注定要遭遇疾病和死亡，从而越来越难以生存？……无论如何，这个“被增强的人类”（常与“被改良的人类”混淆）并非一种必然，反对它出现的意见一直源源不断：它会导致人类分裂为两个阵营：能够从技术辅助中获益的人和负担不起技术费用的人；它可能会窄化人类生物有机体所特有的可完善性和理想人类的标准；它会扼杀自由意志，助长放弃人性的科技决定论；它为克隆战略铺平道路，让人类的基因组不再彼此融合……对人类改良技术的调控必然要接受社会人类学后果的检验，并且会成为哲学问题，这是一些外行人越来越欢迎的问题：该去消除蕴含

在人类境况中的偶然性吗？如果我们想要消除生物的多样性和异种杂交，在一定期限内，控制进化是不是致命的？我们是否要按照外部的标准和范式制造自主生物？

洛朗：我和你有相同的疑问，但是我们很清楚舆论是不足以讨论它们的，因为它们现在正是最热门的话题。面对硅谷的来势汹汹，国家虽然很震惊，却无法迅速应对。最近的政治讨论对我们所谈论的问题流露出了悲观的情绪。迫切需要革新现已沦为短期暴政囚徒的民主领导，因为它已经无法思考NBIC技术革命。是否有可能在我们的命运被技术团体及其丰富的资金，还有独裁统治控制之前，借助数字化让政治重放光彩？或者相反，我们是否应该担心电子政治会通过消灭所有的高瞻远瞩来维持直接的统治？

数字的慈善

随着慈善资本主义这个具有长远眼光的第三方参与者的出现，政治权力的分裂更为突出。它结合了工业领袖的专业精神以及一种促进医学和科学发展的救世主的眼光。比尔·盖茨（微软创始人）和商人沃伦·巴菲特没有让自己的孩子继承财产，而是把钱都捐了出来，以实现疫苗在非洲的接种覆盖率，尽管这在当时被认为是不可能的。微软联合创始人保罗·艾伦将大脑遗传学进行了工业化。2015年11月，脸书创始人马克·扎克伯格，未来的世界首富，宣布将把自己财富的99%用于推动个性化教育、医疗创新和社会平等。太空探索技术公司的创始人埃隆·马斯克刚刚创立了用于开发人工智能的基金。这些例子说明硅谷的大人物们有着长远的眼光，并且准备好将自己的大部分财富用于实现在他们看来无比珍贵的超人类主义。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：遗憾的是，你对一个贫乏的政治世界的描绘可能会引起同情。但当人们意识到电子政治潜藏的极权主义风险时，这种同情很快就会被焦虑替代。人们不会期待一个扶植技术方法却摒弃公共意志的政治。我们现代人已经有了一些担忧：例如，我们发现美国有450万的年轻人在使用利他林[78]来提高自己的专注度以获得良好的学业表现。而他们的父母似乎并不担心药物可能导致的副作用，甚至还表态不再让教育去实现苯丙胺所能产生的效果。这里的改进被当作一个技术问题，而非教育的结果。只要还有对人体增强技术类的产品进行消费管控的愿望，我们就可以阻止教育失去它所具有的符号功能，而正是这种功能的存在才使人性得以保留。

洛朗：我同意，学校会在应对我们将要面对的未来这方面发挥核心作用。除了监督人工智能，我们还要对学校进行深入反思。2015年的学校确实像1750年的医学一样陈旧：250年来，它几乎没有任何变化。其组织、结构和教学方法是僵化的，更为严重的是，学校还在为过去的职

业培养人才。好几位著名的教育学家，如艾曼纽尔·戴维登科夫[79]、吕克·费希[80]、弗朗索瓦·塔戴伊[81]，很好地分析了教育模式的衰竭。如何训练孩子们在一个智商并不均等的世界里生活。到目前为止，每一次技术革命都体现为职业从一个产业向另一个产业的转移——例如从农业到工业。而人工智能则带来了更大的危险，因为很多职业不是被转移而是被摧毁。应该如何教育孩子，才能让他们在这个新世界中蓬勃发展？作为向生命传授知识、提供培训的机构，当前的学校形式已经过时。在NBIC技术的支持下，2050年的学校管理的不再是知识而是大脑。因此，学校的三大支柱将被重新定位：内容、方法和人员。首先，有必要恢复人文学科和文化常识的教授，因为想要在技术领域和机器竞争将是可笑的。然后，我们应该根据每一个学生的神经生物学特点和认知特点进行个性化教学：需要发明教育的iTunes。最后，有必要让神经科学专家进入校园，因为2050年的老师实际上将是“神经培育家”。引入NBIC技术以改善教育技术的同时，需要对神经伦理进行深刻反思：没有人希望学校成为一个神经操控机构。面对人工智能推广带来的挑战，推动学校的现代化建设已经迫在眉睫。太阳微系统的联合创始人比尔·乔伊[82]在2000年估计：“未来不需要我们。”我们认为这是一个错误的预言。

11　我们应该畏惧一个“美丽新世界”吗

《美丽新世界》是阿道司·赫胥黎在1931年撰写的预言小说，书中描述了一个极权的世界：在那里，国家有权对婴儿进行筛选，决定他们能否生存，并按其生物潜力把他们分配到相应的社会等级中。但是随着技术的快速发展，赫胥黎的乌托邦可能很快就会成为现实。该如何应对呢？

洛朗：人类在我们身处的这个21世纪发生的改变可能比过去几千年都多，应该对它做出怎样的预测？我们的思想还没有准备好考虑那么遥远的事情，因此可能会产生两种极端的猜测，一种是理想化的，而另一种则相反，是极度黑化的。第一反应是预测人类的消失：我们将进入一个冰冷的、充满敌意的、没有人性的、由疯狂的科学家们领导的世界。生物保守主义者认为，装有电子元件的后人类不再属于人类。他们本能地认为这个未来是反自然的。

让-米歇尔：所有的民主都可能在无政府状态或暴政中失去控制。这是一个可以追溯到柏拉图时代的黑暗预测。到了19世纪，托克维尔提出了一个可能会在我们这个时代实现的预言，这个关于民主的预言并没有比之前的更令人乐观：民主会导致一些个体对自己的自由感到越来越不安，对由民主所维系的世界的不稳定感到越来越害怕；他们对脆弱和不安的感受会逐渐加剧。其结果就是：他们总是要求国家更多干预（福利国家和隐性的监护国家），并任由一种软性专制建立起来，使他们摆脱自由的顾虑。但是20世纪的极权主义利用了民主制度没能预防其成员的政治退场而导致的自身衰败。极权主义已经走得太远了，企图从头开始创作一个可以摆脱历史的新人类，因为我们可以让这个新人类相信自己达到了完美……我们相信自己摆脱了这些极权主义意识形态，并认可民主是哲学家克洛德·勒福尔[83]所说的“卓越历史政体”。这个政体值得我们为之冒险，值得我们为之反对现行的价值观。阿道司·赫胥黎和他的《美丽新世界》，以及乔治·奥维尔和他的《1984》让我们对不可能持续的幸福幻象产生免疫。不，我们不能再听凭一个操纵人类、通过宣传和洗脑驯服人类的世界继续发展……但是我们不曾预见，如果革命性的政治前景（棕色的、黑色的或红色的）对于任何人来说都不再有吸引力，科学和技术甚至某种后人类可以接过接力棒，向我们宣布未来的幸福。

洛朗：这是历史中再正常不过的事情了。我们从未见过技术革命的到来。我们所讨论的超人类和后人类概念可能都是好莱坞的科幻。尤其在欧洲，NBIC技术交融所能带来的进步还不是特别为人所知。对普通公

民来说，我们会在几十年之后成为后人类，这个想法可能像是又一个千禧年理论。但值得记住的是，在任何时代，乌托邦都是被严肃的人所嘲笑的。

被低估的进步

芝加哥大学的著名天文学家弗雷斯特·雷·莫尔顿[84]在1932年说："不可能到达月球，从自然法则来讲是不可能的。地球引力是一个难以逾越的障碍！"1956年，英国科学家理查德·伍利[85]爵士说："所有关于太空旅行的文章都是无稽之谈！"很受尊敬的工程师李·德·弗雷斯特[86]也说："用火箭把一个人送上太空，然后把这个火箭放在绕月轨道上……我现在可以告诉你们这样的行为永远不可能实现，无论未来科技如何发展，都不可能！"四年后，苏联人加加林在太空飘浮，又过了八年之后，美国人阿姆斯特朗在月球上行走。连最杰出的遗传学家也低估了基因革命：1970年，因预言信使RNA的存在而获得诺贝尔生理学或医学奖的雅克·莫诺[87]在自己的书《偶然性和必然性》（1970年）中写道："基因组的微观尺度可能导致它无法被操纵。"5年后，第一次基因操纵开始了！还有基因测序，仅仅在30年之前，最伟大的生物学家们确信地说要么人类永远无法对所有染色体进行测序，要么必须等到2300年或者2500年！可是基因测序在2003年就完成了，到2025年我们都可以对自己的基因进行测序。这种对科技进步的低估让阿波罗计划之父沃纳·冯·布劳恩[88]宣布："我学会了谨慎使用'不可能'这个词……"

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：从技术方面讲，我们对未来的盲目并非毫无依据。尽管如此，反乌托邦并没有消失；他们只是改变了语调，声称今后自己的表述都会基于科学家（例如神经科学家）所建立的事实或技术专家所推动的现实（例如数字全球化的现实）。我们远没有从极权主义中吸取教训，反而对能够推动某些技术发展的宣传越来越关注：制造人类、操控人类基因组和情绪、消除人类的存在性焦虑以及使之加剧的偶然性、使人类得以永生，等等。用雷蒙·阿隆[89]、克洛德·勒福尔、科内利乌斯·卡斯托里亚迪斯[90]、马塞尔·格歇[91]或是汉娜·阿伦特[92]对极权主义的批评分析超人类主义者做出的复兴承诺，其暴露出的本质让最忠实的信徒也感到害怕。充耳不闻哲学家们的分析，例如米歇尔·福柯[93]对生物权力或是吉尔·德勒兹[94]对控制社会的分析，的确是可悲的，这还证明了从此以后人类将心甘情愿地对NBIC技术进行毫无顾忌的消费。威胁我们的极权主义会类似于符号学家罗兰·巴特[95]所描述的法西斯主义：极权主义作为生物技术的保证，比起它强制做什么，它更少地去限制言论自由。它的实现基于两种事实，其一是政治的名誉扫地，其二是科学技术强加给所有人的保证，即科学和技术会为个人和集体的充分发展提供条件，换句话说就是满足（或是麻醉）稀缺感造成的欲望。因此，超人类

主义者承诺带给我们的幸福就是像社会性昆虫所具有的那种状态：彼此相互联系，维持一种不会产生疼痛的内环境稳态（我想到了在我们所生成的无数连接中，把我们作为神经元一个个连接而获得的全球化的大脑）。

洛朗：你谈到了一种生物极权主义的威胁。我认为由于生物技术革命可以让人类壮大自己的力量并且战胜死亡，人类更不应该抵制它。考虑到习俗的飞速演变，到2080年的时候，当自己周围的人都是“天才”而且几乎可以永生的时候，谁还愿意继续做一个陈旧的、脆弱的、会患病的人？当生物芯片提供的人工智能优于几百万人类大脑的总和并且可以立即访问所有数据库时，谁会满足于仅仅拥有普通的智商和简单的人类记忆？人类群栖的本能，集体带来的压力，以及“处于社会标准中”的必要性会是大多数人拥护生物技术的保证。

让-米歇尔：关于“处于标准中”的问题在我看来是有决定性意义的。我们要如何说服自己去相信超人类主义，不会以你所提到的激进的形式，暴露出对自我的疲乏[96]和“民主人”[97]的绝望呢？当然，一定会有反对意见，认为如今的公民不会像极权国家中的个体一样切断自己与同胞之间的联系。可以说，他属于自己所希望归属的任何社会网络，这样他就能贡献自己的经验以丰富集体智慧。超人类主义的危险在于它援引生物技术作为后人类美好前景的源泉，却不敢给出一些永远可以被证伪的历史法则，这一点与斯大林主义如出一辙。从这个意义上说，它的诱惑力更为有害。超人类主义会迅速归化人类（把人类当作仅具有生物功能的基础结构），注定让技术占据全面支配地位，于是它更坚信历史极权主义提出的观点：人类是一个失败的物种，是时候取而代之了。

民主2.0？

通过数字化让民主得到复兴是我们时常能听到的小声哼哼，但是谁会真心为它纵情欢唱呢？所有人的身份都被数字化了，仅仅体现为我们在网络上留下的痕迹，这种情况愈发明显；生而为人所独有的不可被替代的感觉，即全部道德的前提已经不再属于我们这个时代，至多不过是一种主观上的责任感。从今以后，内心生活会成为一种反价值，必须获得救赎或与之一刀两断……随着技术进步主义对苟活于世、对没有尽头（也没有意义）的寿命、对剥离了使人之所以为人的符号维度的生物学特性的痴迷不断获得满足，人类将处于一个生物极权的世界。得要一种多么轻浮草率（或是不切实际）的心态才能去相信民主只能从网络的兵器库——混合论坛、请愿网站、博客、推文里汲取力量才不会衰败：无论人们做什么，“传播人”只愿流离在转移和过渡之中，只愿处在“向前逃离”的状态里：无法直面现实，只会逃避问题，还会轻率地把煽动人心的鼓掌欢呼与深思熟虑之后的审慎判断、表现欲和自信心、透明度和真实性之间的区别混为一谈……

洛朗：你的推论就好像这种对人类的替代会发生在地球上的每一个角落一样。关于这一点我想要强调，许多知识分子，如雅克·阿塔利[98]，都向往建立一个世界政府，而我认为这很荒唐。如果在地球上创造其他不同于人类智慧的智能的决策必须在全球范围内推行，有些领域也不能被集中管控。唯一的决策中心会导致某种极权制度，因为没有人能够从中逃脱。有必要保持几个地缘政治的极点以保证意识形态的竞争。多元化和反对权力的必要性对于现在的传统政治和未来的生物政治都非常重要。我们必须有处可逃。神经安全和对人类大脑的保护就是这方面的典例。一个决定在全球范围内对脑科学进行管控的世界不会留下任何可以逃脱的出口。如果神经科学朝着极权主义下滑，那么人们应该逃到哪里去？不会再有不受中央神经生物技术政权影响的空间。这简直是人类自由的噩梦。此外，应该让NBIC的科学家，尤其是致力于脑科学的人也来学习希波克拉底[99]誓言！

12　我们的研究将去向何处

“到2030年，人脑可以与电子纳米元件融合，人类将拥有造物主的权力。”

——雷·库兹韦尔，2016

显然，人类生活在宇宙中。但是宇宙也可以被改良吗？这个愿景让超人类主义的支持者们激动不已，但也招致批评。人类应该把自己所具有的这种可以改变自身和世界的能力发展到何种程度？

洛朗：我要和你讲的不是2019年，而是遥远的未来！在很久很久以后，人类会变成什么样？哲学家们一直都对宇宙的起源颇有兴趣：莱布尼兹在1740年提问：“为什么这里会有东西，而不是空无一物？”可是很少有思想家关心宇宙的未来。然而宇宙的命运是注定悲惨可怕的！天文物理学家们为之建模了六种情形，从“大坍塌”（反向大爆炸）到“大冻结”（所有能量消失），都会引向宇宙的死亡和我们存在痕迹的彻底消失。人类近来才意识到地球可持续发展的必要性，我们发现宇宙本身的寿命就是有限的。

让-米歇尔：对遥远未来的反思在我看来毫无意义，因为不确定因素太多，并且眼前的问题才是重要的。况且，将这个遥远的期限定为十亿年是合理的吗？

洛朗：我的想法正好相反，这种对未来的设想是有用的，因为它会让我们质疑自己的价值观。善与恶的概念适用于对宇宙的描述吗？如果随着宇宙的消亡，人类所有文明的痕迹也跟着消失，那么我们生存的意义是什么？科学以及人性的终极目标是什么？一位年轻的法国哲学家克莱蒙·维达尔[100]在一本非常精彩的书《开始与结束》（2014年）中成功地对这种消亡的风险进行总结。在克莱蒙·维达尔看来，最后一个问题的答案是明确的：科学的终极目标是通过人工创造新宇宙来对抗宇宙的毁灭。在消灭了死亡之后，科学开始对抗宇宙的消亡。在未来的几十亿年里，人工宇宙的生成会调动起人类的所有能量。在通过干细胞对人类老化的机体进行再生之后，宇宙的再生可以使宇宙永不消亡或者被取代。

让-米歇尔：我再说一次，这种对遥远未来的思考在我看来毫无意

义。我更想考虑的是，是否应该对人类的可完善性加以限制？或者说：在某一个特定的时刻，是否应该冒着阻碍人类历史进程的风险，拒绝继续追求进步？我个人对陈旧的社会没有任何怜悯之心，因为这些社会要求我们模仿前人，将传统视为绝对规范，以延缓时间带来的有害影响。但是我认为不讨论现代主义理想图景是不可能的，因为如果进步是不可以被讨论的，那也不可能形成可以指导人类行为的价值观。我们别无选择，只能以实证的方式选择相信事实。因为我既不是动物，也不是机器，我反对把事实奉为权威，反对科学发号施令并把道德观点贬斥为一种无知。也就是说，一切还都是待检验的。如何评估什么是改善？就因为它会带来相关的或者反常的效应，就因为它无法服务于所有人的利益，就因为它是某种工具化或者某种操纵的反面……就能表明它实质上不是一种改善吗？把宣称是由NBIC技术带来的改善看作是关于我们想要强加在人类身上的形式的一种偏见（意识形态的、政治的、工业的、文明的……），这并不是一件反动的事情，尽管这是一种有争议的偏见。我已经说了很多次，例如，把我的大脑与网络相连接而获得的“整体思维”势必会让我感到恶心，联网医学在我看来是会导致疑病症普遍发作的，延长寿命的目标自然会吸引我，但前提是生活的伦理政治不应被看作是不可判定的问题。毕竟，人们认为如今人类的睡眠时间远少于19世纪是一种进步，我当然能感到我生存的时间相应地延长了，但同样压力也在增长，这种压力毒害了我这样的失眠患者！我们依然会遇到不想用各种人工产品改善自己生活条件的人，但是我们还是会让他们自己去决定什么是对自己有利的。在这些人眼中，技术是对一切智慧的否定，因为它先验地排斥我们想在这个世界中找到自己位置的渴望，就好像宇宙已经永远地把位置分配给了我们。

洛朗：你讲到了智慧，而我在思考与宗教有关的问题，因为库兹韦尔宣布的奇点成了一种新的宗教。这种认为未来的人类是全能的并且可以永生的观点，让人联想到类似于《超验骇客》[101]的好莱坞剧情，令人发笑。然而这确实反映了一项基本运动。有史以来第一次，有一场哲学运动声称要把人从会受到大自然和超验性摆布的客观条件中拉出来，让他自己去领导进化的方向。

一个新宗教

超人类主义是宗教思想演变的最后阶段。宗教思想的演变总共经历了三个阶段。首先是延续萨满教逻辑的多神论，在罗马人和希腊人的思想中达到顶峰。然后是与圣书有关的一神论。现在第三个阶段兴起：人神。对于超人类主义者来说，赛日·甘斯布[102]的玩笑是人尽皆知的：“人类创造了上帝，而上帝是否创造了人还有待考证。”上帝还不存在：有NBIC技术带来的几乎无限的力量，神将会是未来的人。人类将可以实现本来只有神才能做到的事情：创造生命，改变基因组，重组人类大脑，让死亡安乐死。

洛朗·亚历山大

让-米歇尔：我已经说过了：对于我来说，如果没有被“放入文化中”，也就是说没有被放入一个能赋予我们更理想的人类状况的象征性维度里，那么添油续命乃至谋杀死亡就都是无稽之谈。法国超人类主义协会“技术进步”（Technoprog）组织者迪迪埃·高尔耐勒和马克·鲁斯所坚持的“服务于社会进步的超人类主义”，当然希望“改善我们群体生活的人性观念”（《技术进步》，2016年）。但是如果我们不去拒绝日常生活中负载于信号之上的过载部分，也就是不去抵御使我们的生存从属于技术的自发倾向，它该如何实现呢？它的问题非常明确：为了实现一种可以防范自我毁灭的假想的社会和谐，用来消除群体生活危害的技术创新究竟该发展到何种程度？

洛朗：关于这个问题，一些哲学家，比如克莱蒙·维达尔回答说没有限制。在超人类主义者看来，让宇宙永存以保障人类的永生是理性的，而不是极度的浮夸。实际上，跟多神论和一神论的宗教一样，超人类主义只是把人类的能力与信仰联系在了一起。在NBIC技术成功前，我们难以想象能有一种普罗米修斯式的宗教会去颂扬人类在面对环境时的无所不能。如今的宗教帮助人类在信仰中承受死亡，但不能帮助我们消除它。对于大多数超人类主义者来说，NBIC技术让上帝失去了权威，并且用赛博格代替它。技术的宗教是否正在代替传统宗教？在超人类主义者和生物保守主义者之间是否会有严重的对立甚至宗教战争？抑或仅仅是温和的过渡？这个宗教发展的第三阶段充满了精神分析的威胁。1972年，雅克·拉康[103]在鲁汶大学的一场充满激情的会议上解释了为什么死亡对人类的生活有帮助，以及为什么如果生命是无穷无尽的，那么它将会是可怕的。当一切皆有可能，人类就会变得疯狂。精神分析告诉我们，没有约束会导致多大的混乱。超人类主义的意识形态夸大了人类对全能的幻想，会带来很多精神疾病。超人类生活在自己无所不能的幻想中，这对人的心灵来说是极端有害的。有一件事可以确定，精神科医生是未来需要的职业！

让-米歇尔：你刚提到了雅克·拉康，他很好地诠释了人性赋予我们的意义。最后，我想用一则逸事作结，这则逸事可以让我们忘记信号和符号的对立，我从中看到的是我们时代的危险：2016年3月巴黎图书沙龙期间，我和哲学家米歇尔·塞尔[104]受邀参加一场围绕一部名叫《成人世界》（2014年）的漫画展开的公开辩论，漫画作者是一位名叫吴永进的韩国人。我们谈论了增强人，谈到了让它时而极富吸引力，时而令人心生厌恶的现实与幻想。米歇尔·塞尔想要让那些恐惧技术的人哑口无言，可能把我也算作其中一员，他当着大家的面说了以下这番话：“我们都是被增强的人，尤其是在这个沙龙里的人。我们被书籍围绕，这些书在提升着我们的精神，如果没有不断发展的写作事业，我们的精神将一无是处！”实际上，这个论点是被反复提起的：为什么超人类主义者的期待与写作革命允许体现和满足的期待是不同的呢？我斗胆回答了米歇尔·塞尔的问题，在我看来，数字革命不是延续写作而是对其产生威胁。我对他说，当代科技正迫使我们接受越来越多的信号，这些信号要求我们越来越快地做出反应，而书籍则让我们处于与自我、与作者、与读者对话的长久关系之中，总之是自我与他人的人性交流。希望这本书也可以

起到这个作用！

[1]　加里·卡斯帕罗夫（Gary Kasparov，1963—　），苏联、俄罗斯国际象棋选手，22岁时战胜阿那托里·卡尔波夫成为世界上最年轻的国际象棋世界冠军。1996年，他首次与IBM公司发明的超级电脑“深蓝”交手并取得了胜利。1997年，他与改进之后的“深蓝”再战时落败。——译者注（本书注释均为译者注）

[2]　嘉玛（Carmat），法国一家致力于开发完全人造心脏的医疗公司。

[3]　阿道司·赫胥黎（Aldous Huxley，1894—1963），英国作家、思想家。他于1932年出版的长篇小说《美丽新世界》是20世纪最杰出的反乌托邦文学经典之一。

[4]　克劳德·伯纳德（Claude Bernard，1813—1878），法国生理学家，被誉为“实验生理学奠基人”。引言部分的文字出自其作品《实验医学研究导论》。

[5]　丹尼斯·加博尔（Dennis Gabor，1900—1979），匈牙利裔英国物理学家。1971年的诺贝尔物理学奖被授予他，以表彰他发明并发展了全息摄影。同时，他也是一位对社会的发展非常关注的学者，代表作品主要有《展望未来》《科学、技术与社会》和《成熟的社会》。

[6]　幼态延续（néoténie），指一个物种把幼年的甚至胎儿期的特征保留到幼年以后甚至成年期的现象。它可能是某些控制个体发育的调控基因发生突变引起的，使得人类的大脑在出生后相当长的一段时间内还会继续增大、发育，并让人一直具有学习的能力。稀疏的体毛是这一状态的重要特征。

[7]　皮埃尔·布尔（Pierre Boulle，1912—1994），法国著名作家，其代表作品《人猿星球》《桂河大桥》均被改编成电影。

[8]　碧姬·芭铎（Brigitte Bardot，1934—　），出生于法国巴黎，法国著名演员、歌手、模特、动物权益保护者。

[9]　卢德分子（Luddite），指出现在19世纪英国工业革命时期，由于机器代替了人力而失业的技术工人。他们以奈德·勒德为精神领袖，有组织地进行抗议示威活动，以让社会了解他们的诉求，并使社会回归到工业革命以前的状态。现引申为有反机械化以及反自动化观点的人。

[10]　阿米什人（Amish），或称阿米什教徒，由一群在19—20世纪期间移民美洲的欧洲再洗礼派和教徒组成。他们有着坚定的信仰，过着相对与世隔绝的生活，以拒绝现代化的生活而闻名。

[11]　耶和华见证人会（Témoins de Jéhovah），一个被世界主流基督教公认的异端组织。由查尔斯·拉塞尔于1881年在美国创立。他们相信地

球末日即将到来，地球将灾祸不断，但基督会很快复临，消灭一切其他教派的人。他们以不投票、不服兵役、不输血、不庆祝除与基督有关的其他节日等特点而著称。

[12] 唐氏综合征，又称小儿唐氏综合征，或21 -三体综合征，是一种由染色体异常（多了一条21号染色体）导致的疾病。患儿在胎儿早期多发流产，存活者有明显的智力发育迟缓、生长发育障碍等特征。

[13] 让·罗斯丹（Jean Rostand，1894—1977），法国作家、生物学家、科学历史学家，1959年当选为法兰西学术院院士。

[14] 雷·库兹韦尔（Ray Kurzweil，1948— ），美国作家、发明家和未来学家，是未来主义和超人类主义的拥护者，现为谷歌工程总监，其代表作有《心灵机器时代》《奇点临近》等。

[15] 普罗泰戈拉（Protagoras，约前490—前420），古希腊哲学家，是智者学派的代表人物。其著作除少数片段外均已失传，但仍可从柏拉图的对话录《泰阿泰德篇》和《普罗泰戈拉篇》中略见一二。《普罗泰戈拉篇》涉及了对美德和智者学派教育的讨论。

[16] 尼克·博斯特罗姆（Nick Bostrom，1973— ），瑞典哲学家，以其对人择原理和信息模拟的研究而出名。2005年，他在牛津大学创办人类未来研究所，并担任研究所主任。

[17] 亨利·阿特朗（Henri Atlan，1931— ），法国生物学家、哲学家和作家。1983—2000年间，他曾是法国国家伦理咨询委员会成员。其代表作品有《生物学组织和信息理论》《生活问题：在知识和舆论之间》《无理与有理：科学与神话的相互批评》。

[18] 目前，全世界约有30多个国家和地区实现了同性婚姻合法化。

[19] 赛博格（cyborg），是英文cyborg（cybernetic organism 的缩合）的音译，指生化人、改造人，即机械化有机体。对赛博格来说，机器是身体的一部分，但思考和行为均由有机体控制。

[20] 堂娜·哈拉维（Donna Haraway，1944— ），美国哲学家、女权主义者。其代表作品有《灵长类视觉：现代科学世界中的性别、种族和自然》《类人猿、赛博格和女人》等。

[21] 成纤维细胞（fibroblast），又称纤维母细胞，是疏松结缔组织的主要细胞成分，属于终末分化细胞，对不同程度的细胞变性、坏死和组织缺损以及骨创伤的修复有着十分重要的作用。

[22] 端粒酶（télomérase），细胞中逆转录酶的一种，可以把端粒修复延长，使端粒不会因细胞分裂而有所损耗，这样细胞分裂复制的次数就可以增加，从而延缓细胞的衰老。

[23] 米歇尔·维勒贝克（Michel Houellebecq，1956年或1958年— ），法国作家、诗人。其代表作品有《地图与疆域》《一个岛的可能性》，亦为美国恐怖小说家洛夫克拉夫特作传记《H. P.洛夫克拉夫特：对抗世界，对抗生活》。

[24] 强迫性重复（compulsion de répétition），由弗洛伊德提出，指一种不断重复过去的经验和情境的内在倾向，而生命想要回归无机状态的内在冲动，也就是死本能，则会通过强迫性重复表现出来。

[25] 雅克·吕费耶（Jacques Ruffié，1921—2004），法国血液学家、遗传学家和人类学家。其作品有《从生物学到文化》《性与死》。

[26] 《千钧一发》（*Gattaca*），又名《变种异煞》，一部由安德鲁·尼科尔执导、上映于1997年的科幻电影，探讨了人与科技的关系。

[27] 乔治·丘奇（George Church，1958— ），美国遗传学家、化学家，是基因编辑和基因测序领域的领军人物，获2016年诺贝尔化学奖提名。

[28] 良好状态（bien-être），出自世界卫生组织对健康的定义："健康乃是一种在身体上、精神上的完满状态，以及良好的适应力，而不仅仅是没有疾病和衰弱的状态。"法语原文作La santé est un état de complet bien-être physique, mental et social, et ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité. bien-être在法语里意为"幸福""福祉"，此处为了与上下文中的其他词语做出区分，同时为了与健康的定义里的"完满"相呼应，特译作"良好状态"。

[29] 在世存在（être-au-monde），即海德格尔所讲的此在的存在方式是"在世界之中存在"。

[30] 格奥尔格·格罗德克（Georg Groddeck，1866—1934），德国心理学家、作家，与弗洛伊德一直保持通信往来。

[31] 伊莎贝尔·迪诺尔（Isabelle Dinoire，1967—2016），世界上首位接受面部移植手术者，手术于2005年进行。她因大量使用反抗体治疗的药物而罹患两种癌症，于2016年去世。

[32] 疑病症（hypocondrie），以担心或相信自己患有某种严重躯体疾病或身体畸形的持久性优势观念为主的神经症。

[33] 若泽·博韦（José Bové，1953— ），法国左翼政治家，曾任欧洲议会议员，是当代另类全球化运动的代表人物之一，以反对基因改造作物的公民抗命运动而闻名。

[34] La Manif，即La Manif Pour Tous（LMPT），法国一个反对开放同性婚姻、反对性少数群体抚养子女，捍卫传统家庭结构的集体组织。

[35]　超级回路（Hyperloop），由埃隆·马斯克提出的一种运输系统理论，即利用磁悬浮原理，让胶囊化的列车车舱在接近真空的管道里运行，尽量消除摩擦力和空气阻力的影响，列车时速最高可达760英里（约1 223千米），又被称作“超级高铁”。

[36]　太阳城（SolarCity），是埃隆·马斯克于2006年与合伙人联合创办的一家太阳能光伏发电公司。

[37]　太空探索技术公司（SpaceX），是埃隆·马斯克于2002年创立的一家太空运输公司，主要业务有研发航天器和火箭发动机、进行空间站人员和补给的运输、发射商业卫星等。

[38]　彼得·斯劳特戴克（Peter Sloterdijk，1947—　），德国哲学家，著有《欧洲道家思想》《玩世理性批判》等。

[39]　皮埃尔-约瑟夫·蒲鲁东（Pierre-Joseph Proudhon，1809—1865），法国政论家、经济学家，被称为无政府主义之父。其代表作品有《贫困的哲学》《什么是所有权》等。

[40]　皮埃尔·布尔迪厄（Pierre Bourdieu，1930—2002），法国社会学家、人类学家和哲学家。其代表作品有《区隔：品味判断的社会批判》《文化生产的场域》《艺术的规则》等。

[41]　何塞·帕迪里亚（José Padilha，1967—　），巴西电影导演。其作品《精英部队》获第56届柏林国际电影节金熊奖最佳影片。影片《机械战警》（*Robocop*）讲述了一位被杀害的人类警察依靠前沿技术以机械形态复活并展开复仇的故事。

[42]　凯文·沃里克（Kevin Warwick，1954—　），英国科学家，研究方向集中在人工智能、生物医学工程、控制系统和机器人等领域。从1998年开始，他陆续向自己的身体里植入芯片，开始了“赛博格计划”。

[43]　力比多（libido），在弗洛伊德看来，力比多是性冲动在心理层面的动态表现，这是一种蕴含在心理无意识结构中的能量或者说本能的力量，它可能会转变成迷狂性心理症或恐惧症。

[44]　斯派克·琼斯（Spike Jonze，1969—　），美国电影导演，代表作品有《郊区一隅》《她》等。影片《她》讲述的是人与人工智能操作系统恋爱的故事，获第86届奥斯卡金像奖最佳影片提名。

[45]　恐怖谷（vallée de l'étrange），由日本科学家森政弘在1970年首次提出的科学理论，即如果机器人的外形与人类越来越接近，它的不完美之处就会引发人的极度厌恶和恐慌，但是这个界限一旦被超越，机器人与人类的相似度继续增加，人类对它的接受度也会随之增加。

[46]　让娜·卡尔芒（Jeanne Calment，1875—1997），一位来自法国

的百岁老人，也是人类历史上有确切记载的最长寿的人。不过，也有研究者质疑其年龄的真实性。

[47] 《一个岛的可能性》（*La Possibilité d'une Île*），法国作家米歇尔·维勒贝克于2005年出版的小说，讲述了克隆人对人类情感的探索。小说已有中文译本，并被翻拍成了电影。

[48] 嘉立科（Calico），谷歌于2013年宣布创建的一家生命健康公司，旨在对抗死亡，让人类活得更长、更健康。

[49] 埃米尔·米歇尔·齐奥朗（Emile Michel Cioran，1911—1997），罗马尼亚文学家、哲学家，中文名又作萧沆。其作品有《解体概要》《苦涩三段论》等。下文“诞生之不便”取自其作品《诞生之不便》。

[50] 尤尔根·哈贝马斯（Jürgen Habermas，1929— ），德国作家、哲学家和社会学家，法兰克福学派代表人物之一。其代表作品有《公共领域的结构转型》《在事实与规范之间》《现代性的哲学话语》等。

[51] 马奎斯·德·孔多塞（Marquis de Condorcet，1743—1794），法国数学家、哲学家，启蒙运动时期的代表人物之一，代表作品是《人类精神进步史表纲要》。

[52] 弗朗西斯·高尔顿（Francis Galton，1822—1911），英国科学家，优生学的开创者。其主要作品有《遗传的天才》《人类官能及其发展的研究》以及自传《一生的回忆》等。

[53] 朱利安·赫胥黎（Julian Huxley，1887—1975），英国生物学家、作家，现代进化论的创始人。

[54] 23andMe，一家由安妮·沃西基于2006年创立的提供基因检测服务的公司，得到了谷歌的投资。

[55] 弗朗索瓦·雅各布（François Jacob，1920—2013），法国科学家，分子生物学奠基人之一。因与雅克·吕西安·莫诺共同提出解释大肠埃希菌乳糖代谢相关基因表达调控的“操纵子模型”，极大地推动了生命科学的发展，二人共同获得1965年诺贝尔生理学或医学奖。

[56] 诺姆·乔姆斯基（Noam Chomsky，1928— ），美国哲学家、语言学家，代表作品有《句法结构》《转换分析》等。

[57] 京特·安德斯 （Günther Anders，1902—1992），奥地利哲学家（原籍德国），代表作品有《过时的人》。

[58] 阿尔弗雷德·比奈（Alfred Binet，1857—1911），法国实验心理学家，智力测验的创始人，与T.西蒙合作制出了《比奈-西蒙智力量表》。

[59] DeepMind，一家由人工智能程序师兼神经科学家戴密斯·哈萨比斯等人联合创立的人工智能企业。它把机器学习和系统神经科学的最先进技术结合起来，建立强大的通用学习算法。DeepMind于2014年被谷歌收购，AlphaGo即为该公司开发的程序。

[60] 埃里克·布林约尔松（Eric Brynjolfsson，1962— ），美国学者，麻省理工学院斯隆商学院教授，主要研究领域为信息技术及其生产效率和技术变革等。

[61] 安德鲁·麦卡菲（Andrew McAfee，1967— ），麻省理工学院斯隆商学院数字经济研究中心副主任，主要研究方向为信息技术如何影响经济，他也为《哈佛经济评论》《经济学人》《金融时报》等刊物撰写文章，代表作品有《企业2.0》等。

[62] 戴密斯·哈萨比斯（Demis Hassabis，1976— ），英国人工智能研究者、神经科学家、游戏设计师、企业家，DeepMind联合创始人。

[63] 霍华德·加德纳（Howard Gadner，1943— ），美国教育心理学家，创立了多元智能理论，被誉为“多元智能理论之父”。

[64] 杨立昆（Yann LeCun，1960— ），法国计算机科学家，主要研究领域为机器学习、计算机视觉、计算神经科学等。他最著名的贡献是在光学字符识别和计算机视觉上使用卷积神经网络，同时也是深度学习三巨头之一。他是脸书人工智能实验室前负责人，2018年起担任脸书首席人工智能科学家。

[65] 巢（Nest），谷歌旗下的一家智能家居公司。

[66] Picasa，谷歌的一款免费图片管理软件，具有强大的本地图片搜索功能，不过该软件已于2016年5月1日停止服务。

[67] Recode大会（La Conférence Recode），此处指美国科技媒体Recode举办的年度峰会Code Conference，大会通过采访顶尖科技企业高管来探讨未来科技发展趋势。首届大会于2014年举办。

[68] 阿尔伯特·赫希曼（Albert Hirschman，1915—2012），美国著名经济学家，也是当代最伟大的知识分子之一，1915年出生于柏林。其代表作品有《欲望与利益》《反动的修辞》等。

[69] 皮埃尔·勒平（Pierre Lépine，1901—1989），法国医学家和生物学家，法兰西科学院院士。振动叉的发明人是其孙子雅克·勒平（Jacques Lépine）。

[70] 杰伦·拉尼尔（Jaron Lanier，1960— ），美国计算机科学家、哲学家、视觉艺术家、古典音乐作曲人，被认为是“虚拟现实技术之父”。其代表作品有《你不是一个器件》《谁拥有未来》等。

[71]　托马斯·皮凯蒂（Thomas Piketty，1971—　），法国经济学家，《21世纪资本论》的作者，主要研究方向为经济和社会的不平等现象。2013年获欧洲经济学会伊尔森·约翰逊奖。

[72]　若埃尔·德·罗斯奈（Jol de Rosnay，1934—　），法国科学家、未来学家、作家。其作品有《生命的起源：从原子到细胞》等。

[73]　彼得·泰尔（Peter Thiel，1964—　），德裔美国企业家，风险投资家，Paypal的联合创始人之一，投资了多家著名互联网企业。其代表作品有《从0到1》。

[74]　即希腊语单词hybris或作hubris，法语通常翻译成démesure，古希腊人用以形容一种由激情或是傲慢催生的强烈情感。

[75]　米歇尔·卡龙（Michel Callon，1967—　），国立高等巴黎矿业学校社会学教授、工程师，主要研究领域为科学技术研究。其代表作有《转译社会学基本原理》等。

[76]　布鲁诺·拉图尔（Bruno Latour，1947—　），法国社会学家、人类学家、科学哲学家，与米歇尔·卡龙和约翰·劳一起创立了科学技术与社会行动者网络理论。其代表作有《实验室生活：科学事实的建构过程》《科学在行动：怎样在社会中跟随科学家和工程师》等。

[77]　混合论坛（forum hybride），一种跨行业、跨领域、跨阶层的对公共议题进行讨论的政治辩论形式。

[78]　利他林（Ritalin），俗称“聪明药”，主要成分为哌甲酯，是一种中枢神经兴奋剂，可以提高服用者的注意力，降低疲劳感，但容易上瘾。

[79]　艾曼纽尔·戴维登科夫（Emmanuel Davidenkoff，1969—　），法国记者、专栏作家、广播制作人、随笔作者，主要创作主题为教育。

[80]　吕克·费希（Luc Ferry，1951—　），法国政治家、哲学家，2002—2004年间任法国教育部部长。

[81]　弗朗索瓦·塔戴伊（François Taddei，1967—　），法国生物学家，法国跨学科研究中心（CRI）主任，致力于探索教育创新。

[82]　比尔·乔伊（Bill Joy，1954—　），美国计算机科学家，创立了BSD和Vi编辑器，也是太阳微系统公司（Sun Microsystems）联合创始人之一。

[83]　克洛德·勒福尔（Claude Lefort，1924—2010），法国哲学家，以其对民主和极权的思考而闻名，主要研究马基雅维利和梅洛-庞蒂的思想以及东方集团国家的制度。其主要作品有《历史的形式》《民主的发

明》等。

[84]　弗雷斯特·雷·莫尔顿（Forest Ray Moulton，1872—1952），美国天文学家，太阳系起源的星子理论联合提出者之一。

[85]　理查德·伍利（Richard Woolley，1906—1986），英国天文学家，同时也是英国皇家天文学家。

[86]　李·德·弗雷斯特（Lee de Forest，1873—1961），美国科学家，真空三极管的发明者。

[87]　雅克·莫诺（Jacques Monod，1910—1976），法国分子生物学家，与弗朗索瓦·雅各布共同创立了操纵子理论，阐明基因调节控制蛋白质的合成，极大地推动了分子遗传学体系的建立。

[88]　沃纳·冯·布劳恩（Wernher von Braun，1912—1977），世界著名的火箭科学家，是V2火箭的设计者，为德国火箭技术的发展和美国的宇航事业做出了卓越的贡献。

[89]　雷蒙·阿隆（Raymond Aron，1905—1983），法国哲学家、社会学家和政治学家。其代表作有《知识分子的鸦片》《社会学主要思潮》《历史意识的维度》《民主与极权主义》等。

[90]　科内利乌斯·卡斯托里亚迪斯（Cornelius Castoriadis，1922—1997），法国哲学家、经济学家和精神分析学家，法国当代最重要的知识分子之一。主要作品有《论柏拉图的〈政治家篇〉》《历史与创造》《迷宫的十字路口》等。

[91]　马塞尔·格歇（Marcel Gauchet，1946—　），法国历史学家、哲学家和社会学家，法国当代最杰出的知识分子之一，主要研究方向为现代个人主义、宗教与民主的关系以及全球化的两难境地。

[92]　汉娜·阿伦特（Hannah Arendt，1906—1975），德国哲学家和政治理论家，对极权主义有着非常经典的论述。其代表作品有《极权主义的起源》《人的境况》《耶路撒冷的艾希曼》《过去与未来之间》《论革命》《共和危机》等。

[93]　米歇尔·福柯（Michel Foucault，1926—1984），法国哲学家、观念历史学家、社会理论学家、文学批评家，主要研究知识与权力的关系。代表作有《词与物》《疯癫与文明》《规训与惩罚》《性经验史》《知识考古学》等。

[94]　吉尔·德勒兹（Gilles Deleuze，1925—1995），法国作家、后现代主义哲学家。其代表作有《批评与临床》《尼采与哲学》《斯宾诺莎的实践哲学》《差异与重复》《电影I：运动-影像》《电影II：时间-影像》等。

[95] 罗兰·巴特（Roland Barthes，1915—1980），法国哲学家、文学批评家、文学家、符号学家。其作品和思想对后现代主义产生了重大影响，主要作品有《S/Z》《写作的零度》《符号学原理》《明室》等。

[96] 自我的疲乏（la fatigue d'être soi），出自法国社会学家阿兰·艾伦伯格的论述，即这是一种在一个规范建立在个人能动性和责任基础上的社会所固有的症疾，它是每个人为了成为自己所调动的能量的对立面。艾伦伯格的主要作品有《不确定的个体》《自我的疲乏：绝望与社会》等。

[97] 民主人（homo democraticus），出自托克维尔《论美国的民主》，"民主人"的惰性体现在他们对民主失去热情以及公共精神的衰弱。他们过于沉溺于自己的私人事务，不再关注公共议题，放弃对国家事务的管理，并反而依赖于公共权力为他们提供保护。

[98] 雅克·阿塔利（Jacques Attali，1943— ），法国政论家、经济学家和作家。其作品有《危机之后》《狄德罗或思考的幸福》《布莱兹·帕斯卡》《卡尔·马克思》。

[99] 希波克拉底（Hippocrates，前460—前370），古希腊医师，被尊为"医学之父"。希波克拉底誓言是他制订的医生道德规范，是医学人员入学第一课需要学习的重要内容。

[100] 克莱蒙·维达尔（Clément Vidal），法国哲学家，有认知科学和逻辑学的学术背景，研究领域广泛，包括宇宙学、科学哲学、进化理论、物理学等。其代表作品有《开始与结束》等。

[101] 《超验骇客》（*Transcendence*），一部由沃利·菲斯特执导，上映于2014年，探讨人工智能的科幻电影。

[102] 赛日·甘斯布（Serge Gainsbourg，1928—1991），法国著名艺术家。他演唱歌曲、创作音乐、拍摄电影、写作、绘画，几乎无所不会。其代表作品有唱片《一鸣惊人的赛日·甘斯布》等。

[103] 雅克·拉康（Jacques Lacan，1901—1981），法国精神分析学家，拉康学派创始人。他提出的许多理论都对当代的理论发展产生了深远影响，其思想同时也极具争议。

[104] 米歇尔·塞尔（Michel Serres，1930— ），法国后现代主义哲学家、科学史学家，著作颇丰，作品有《拇指一代》《自然契约》《五种官能》《赫尔墨斯》《寄生虫》等。



未读 Club

为读者提供有温度、有质量、有趣味的

泛阅读服务



专属社群 独家福利

精品共读 活动特权

手机扫码

加入未读 Club 会员计划